



**Источник СИ ЦКП «СКИФ» –
инструмент проведения
передовых исследований и
развития технологий в РФ**

**В.И. Бухтияров, ИК СО РАН
Я.В. Зубавичус, ЦКП «СКИФ»/ИК СО РАН
Е.Б. Левичев, ЦКП «СКИФ»/ИЯФ СО РАН
П.В. Логачев, ИЯФ СО РАН**



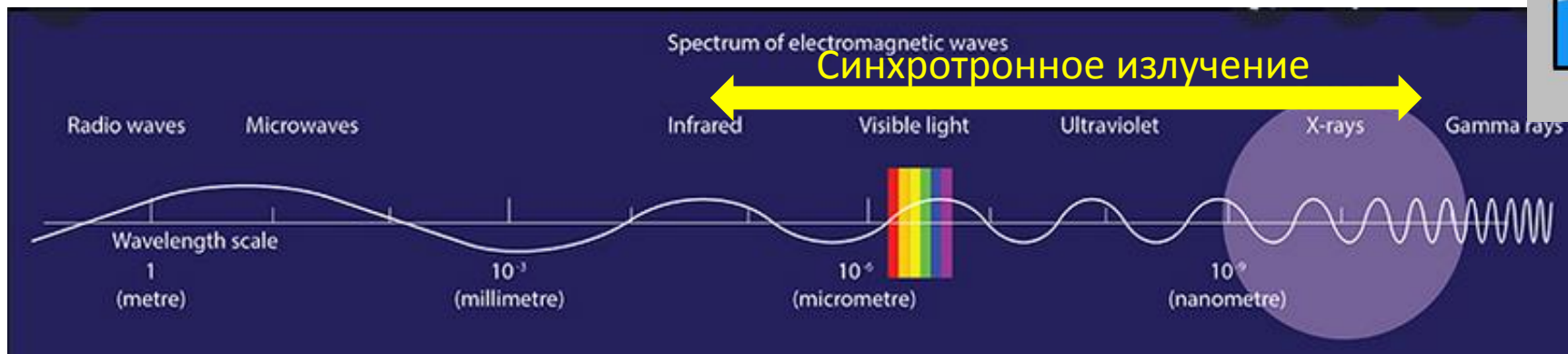
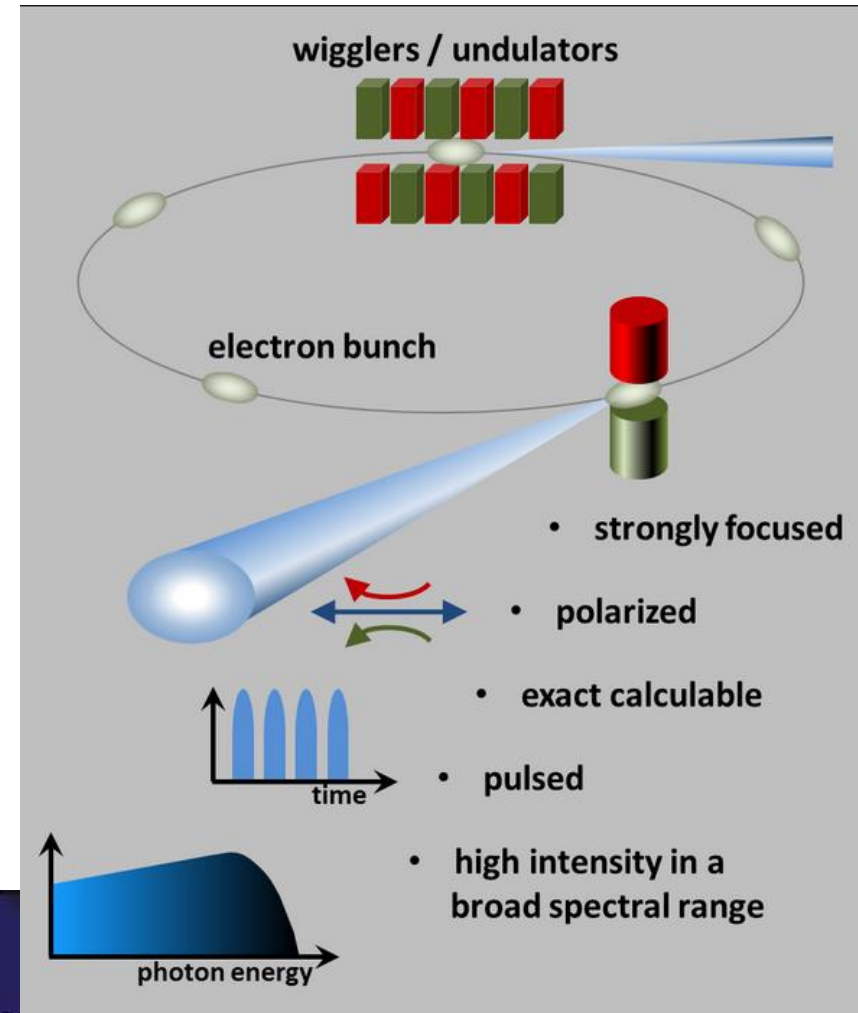
Содержание

- Синхротронное излучение и источники СИ
- Источник СИ поколения 4+ ЦКП «СКИФ»
 - Общая информация
 - Ускорительный комплекс
 - Экспериментальные станции
- Статус проекта на апрель 2023 года

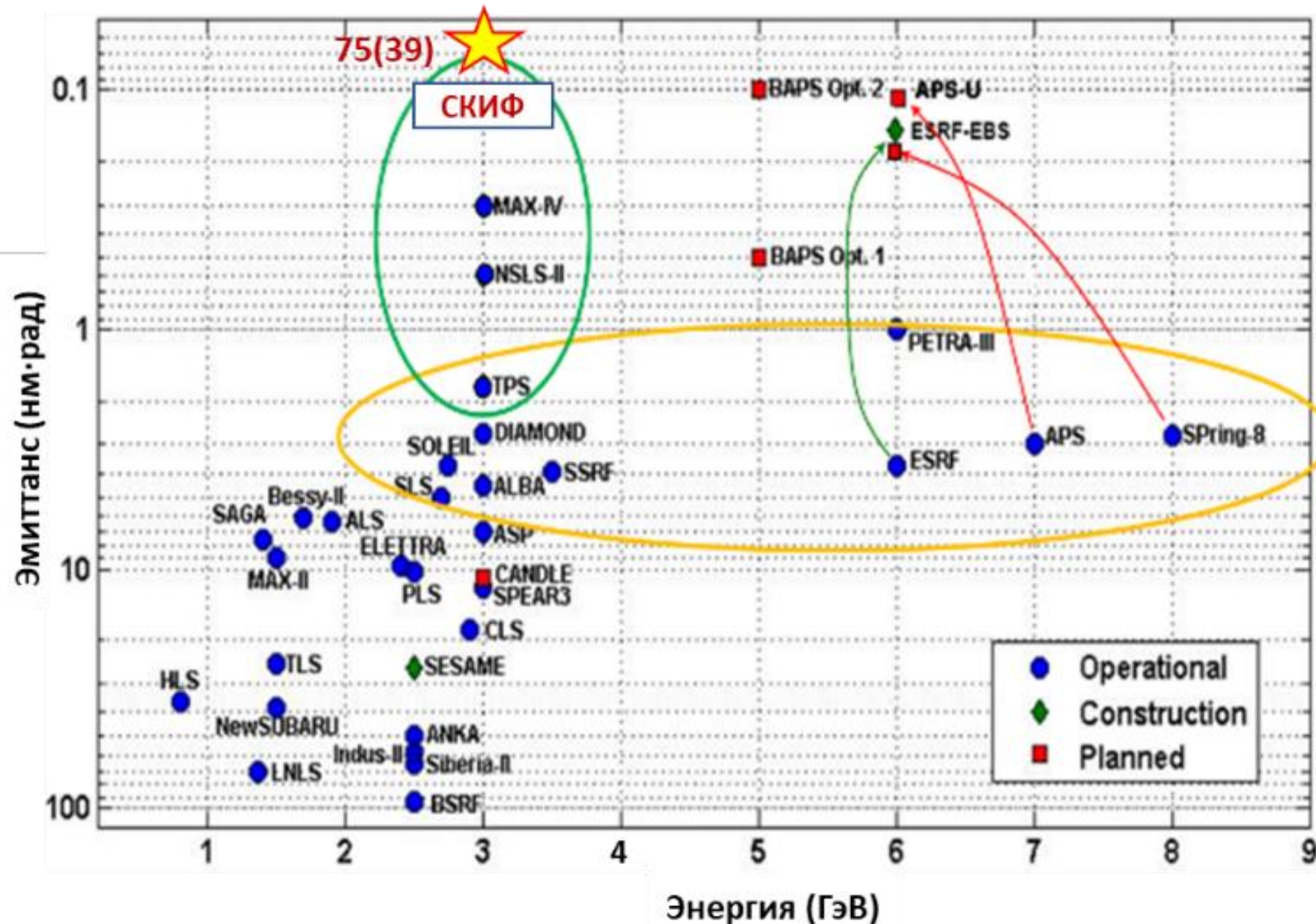
- 
- Синхротронное излучение и источники СИ
 - Источник СИ поколения 4+ ЦКП «СКИФ»
 - Общая информация
 - Ускорительный комплекс
 - Экспериментальные станции
 - Статус проекта на апрель 2023 года

Синхротронное излучение

- СИ – электромагнитное излучение, испускаемое релятивистскими заряженными частицами при повороте в магнитном поле.
- СИ обладает уникальными характеристиками: направленность, широкий спектр, большие поток и яркость, поляризация, когерентность, временная структура и т.д.
- СИ широко используется в науке и промышленности от биологии до материаловедения и от медицины до производства катализаторов.



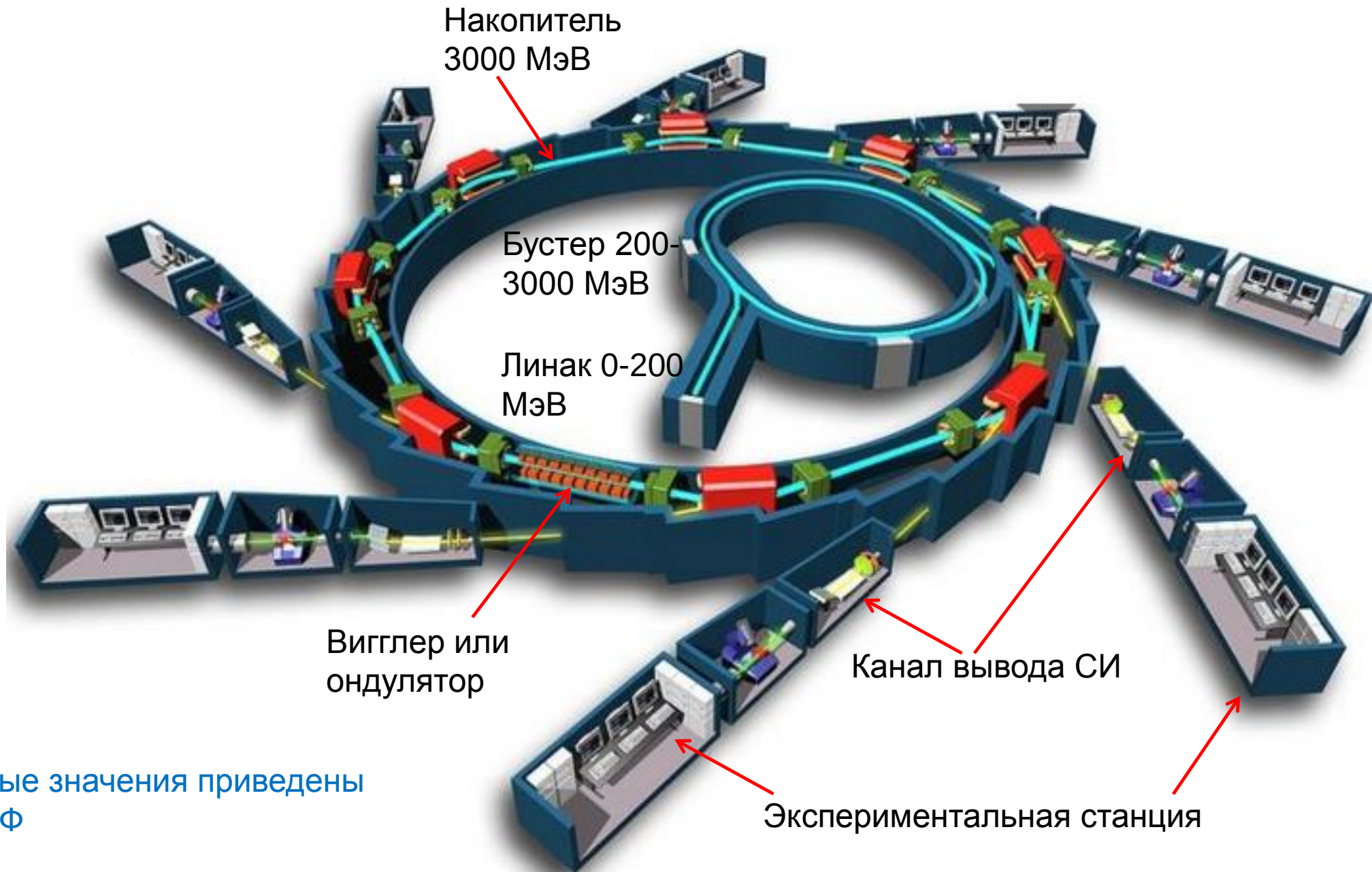
Источники синхротронного излучения в мире



Поколения источников СИ:

1. Не спец. (коллайдеры или синхротроны).
 $\epsilon_x \sim 300-500$ нм (ВЭПП-3, ВЭПП-4, BEPC, DAPHNE)
2. Спец. накопители, несложная оптимизация эмиттанта.
 $\epsilon_x \sim 20-100$ нм (CAMD, SAGA, DELTA, Сибирь-2, ANKA, ...)
3. Спец. накопители, эмиттанс оптимизирован, излучение из ондуляторов. $\epsilon_x \sim 1-10$ нм (ALS, ESRF, Diamond, ALBA, BESSY...)
4. Эмиттанс предельно оптимизирован. $\epsilon_x \sim 500-100...10$ пм (MAX IV, ESRF-EBS, Sirius, «СКИФ»...).

Структура источника СИ (схематично)



Численные значения приведены
для СКИФ

Содержание

- 
- Синхротронное излучение и источники СИ
 - Источник СИ поколения 4+ ЦКП «СКИФ»
 - Общая информация
 - Ускорительный комплекс
 - Экспериментальные станции
 - Инженерная инфраструктура
 - Статус проекта на апрель 2023 года

Начало...



Базовые требования к ЦКП «СКИФ»

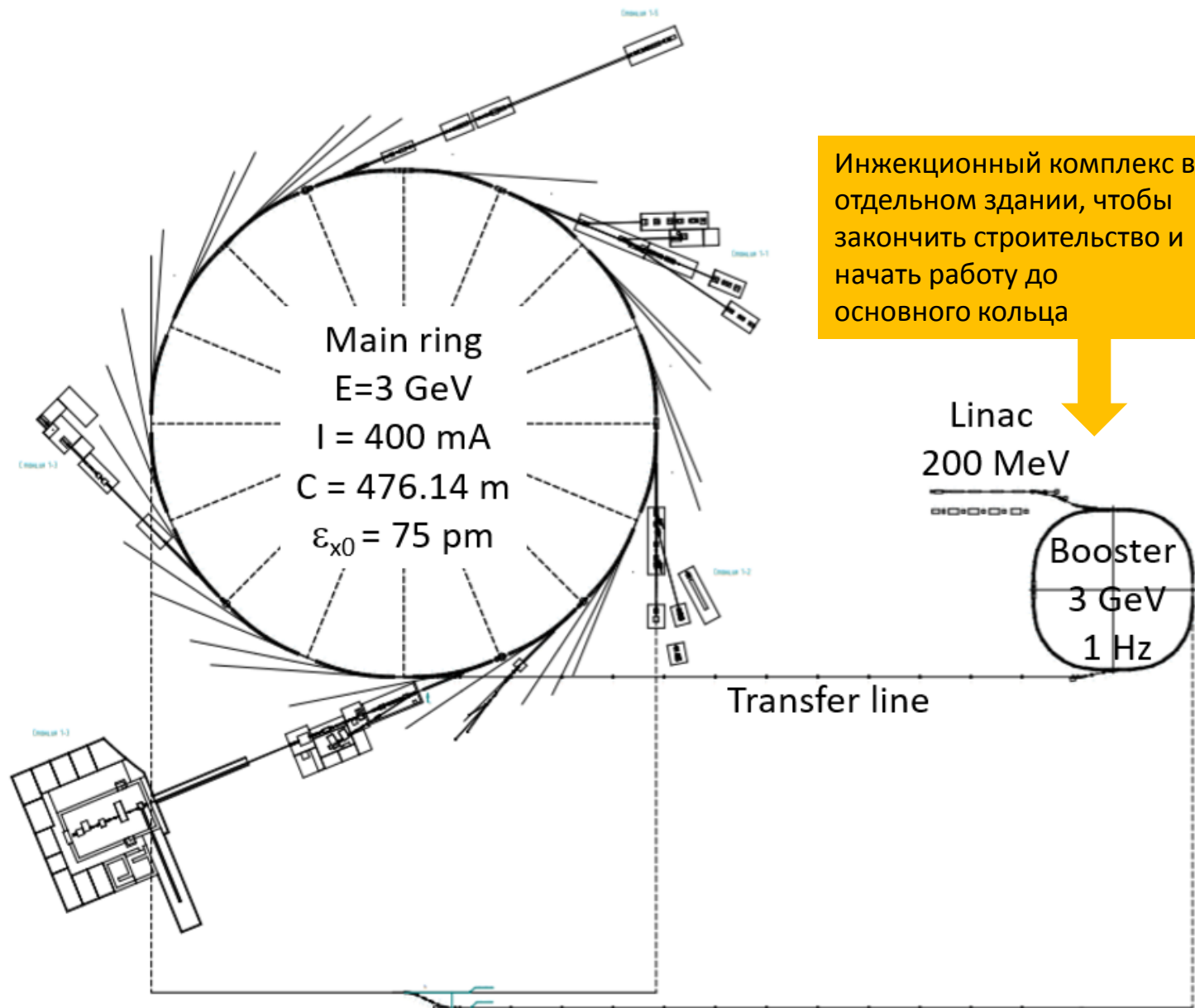
- ✓ Энергия пучка 3 ГэВ
- ✓ Периметр < 500 м
- ✓ Радиационный эмиттанс ≤ 75 пм
- ✓ Инжекционный комплекс уже создававшийся в ИЯФ: 150-200 МэВ линак, бустер
- ✓ Достаточное число и разнообразие каналов излучения
 - вигглеры и ондуляторы (в прямолинейных секциях)
 - жёсткий рентген (сильнополевые диполи)
 - мягкий рентген и VUV (слабополевые диполи)
- ✓ Минимум исследовательской работы; простые, надежные, испытанные решения

Сравнение размеров пучка источников СИ разных поколений



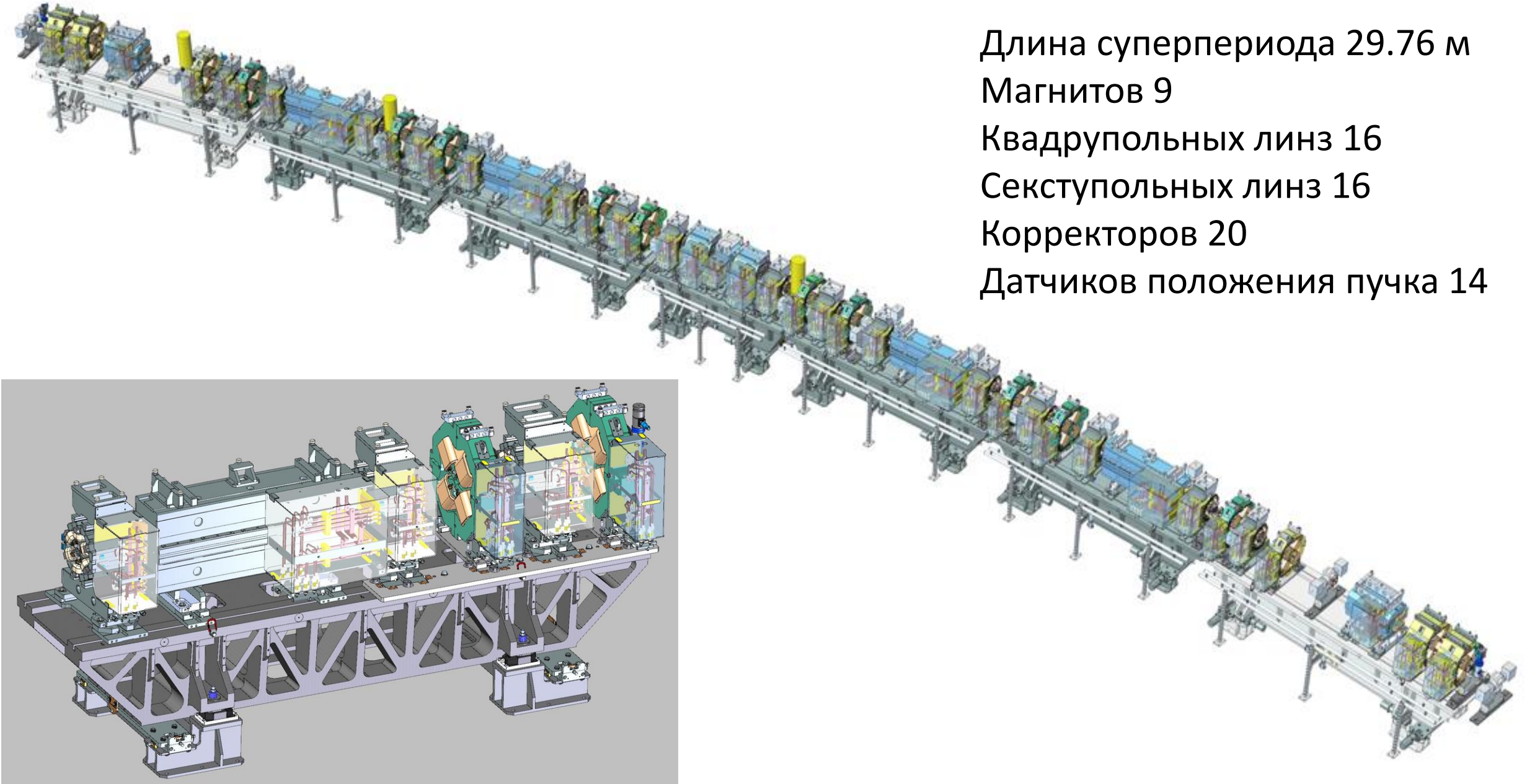
Характеристики источника СИ «СКИФ»

- Линейный ускоритель с энергией 200 МэВ
- Бустерный синхротрон с энергией 3 ГэВ и периметром 158.7 м
- Электронное накопительное кольцо с энергией 3 ГэВ, 16 промежутков $\times$ 6 м, 476 м периметр, эмиттанс 73.2 пм
- До 46 каналов вывода СИ



3D модель суперпериода (1/16)

Длина суперпериода 29.76 м
Магнитов 9
Квадрупольных линз 16
Секступольных линз 16
Корректоров 20
Датчиков положения пучка 14



Источники излучения

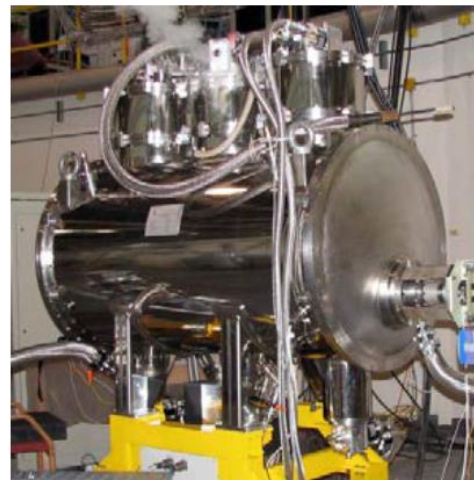
№	Experimental station	ID	B (Т)	λ_w (mm)	N_{per}	L_m (m)	h_p (mm)	P_{SR} (kW)
1-1	Microfocus (5-47 keV)	SCU	1.25	15.6	126	1.99	7	6.99
1-2	Structural analysis (5-40 keV)	SCU	1.25	15.6	126	1.99	7	6.99
1-3	Fast dynamic processes (15-100 keV)	SCW	2.7	27	68	1.84	7	30.7
1-4	XAFS and mag/dichroism (2.5-35 keV)	SCU	1.5	18	109	1.96	7	10
1-5	Hard X-ray imaging (25-200 keV)	SCW	4.5	48	18	0.86	7	39.8
1-6	Photoelectr.spectroscopy (0.01-2 keV)	EMU	0.49/0.05	212	20	4.92	19	2.2



Нижняя половина полюса СП
ондулятора с периодом 15.6 мм

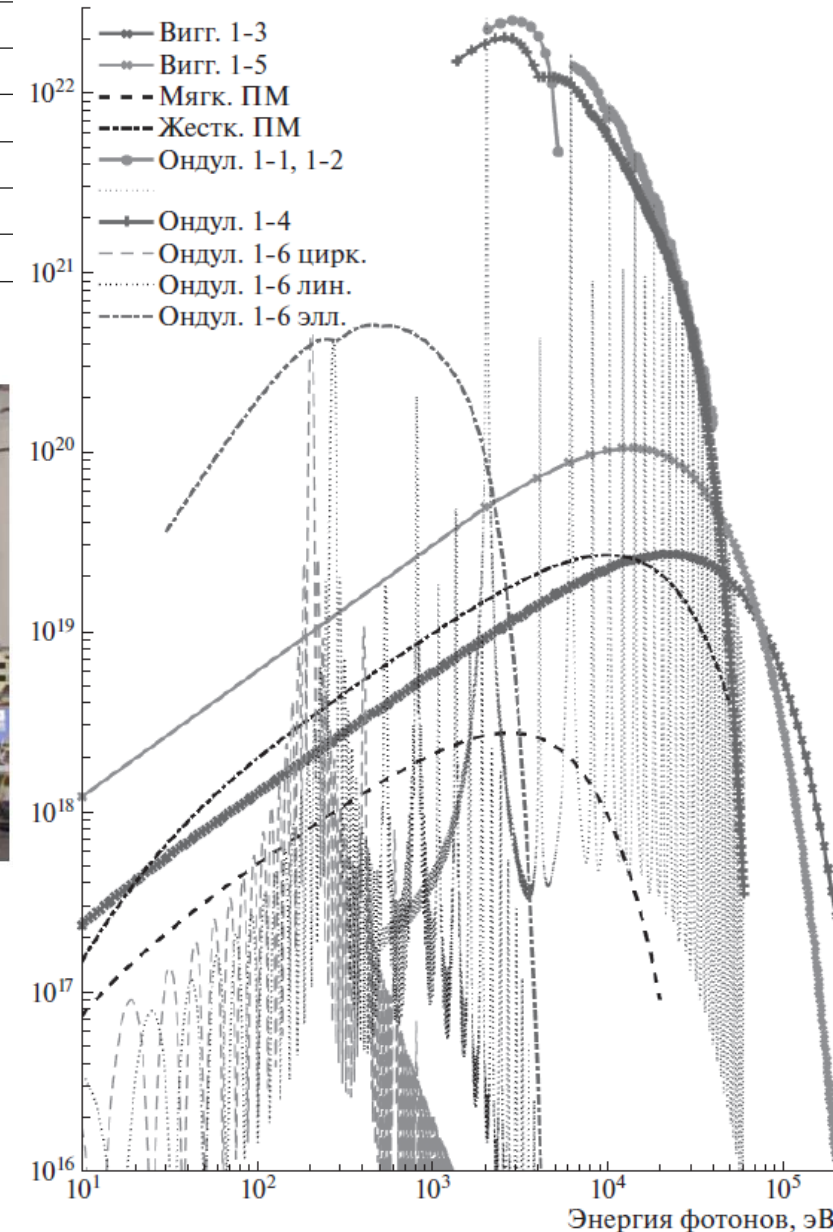


49-pole 4.2 Tesla, $\lambda=48$ mm
superconducting wiggler for
Diamond Light source. 2009



27-pole 4.2 Tesla, $\lambda=48$ mm
superconducting wiggler for
Canadian Light source. 2007

Спектральная яркость, фот./с/мрад²/мм²/0.1% СШ



Формирование портфеля научных задач ЦКП «СКИФ»

Цикл открытых совещаний и семинаров (сентябрь 2017 - 2019):

ИЯФ СО РАН, ИК СО РАН, ИГМ СО РАН, ИГиЛ СО РАН, ИХТТМ СО РАН, ИНХ СО РАН, ИХБФМ СО РАН, Томск, Бийск, Красноярск

Консультации с международными экспертами: неофициальные Scientific Advisory Committee, Beamline Advisory Groups

Онлайн семинары и круглые столы ИК СО РАН: открытый архив видеозаписей
<https://yadi.sk/d/0WV8rEO9Xc509g?w=1>

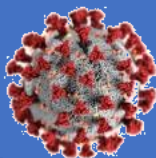
Критерии отбора станций 1-й очереди

- ❖ Высокая актуальность научной программы
- ❖ Амбициозность и реализуемость проекта
- ❖ Наличие сильных научных школ и потенциальных групп пользователей
- ❖ Наличие активной группы из молодых специалистов, готовых взяться за техническую реализацию проекта
- ❖ Раскрытие потенциала нового источника (сверхмалый эмиттанс/сверхвысокая яркость, высокая степень когерентности и пр.)

Направления деятельности ЦКП «СКИФ»

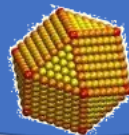
наука

Медицина и
биологическая
безопасность



наука

Зеленые технологии для
химической
промышленности и
энергетики



наука

Новые конструкционные
материалы и технологии
машиностроения



Инфра-
структура

Импортозамещение в
научном приборостроении



Цифра

Цифровизация научных
исследований,
разработок и
образовательных
технологий

кадры

Подготовка научных и
инженерных кадров



Ускоренная разработка противовирусных вакцин



Цель: ускорить цикл разработки вакцин против вирусов с высоким пандемическим потенциалом



Сервис СКИФ: создание информационной модели молекулы вирусного белка по результатам эксперимента макромолекулярной кристаллографии, рациональный подбор молекулы-ингибитора



Оценка эффекта: сокращение цикла разработки новой вакцины до 1–2 месяцев. Двухкратное сокращение затрат. Экономический эффект до 500 млн. рублей.

Гонка по разработке антиковидных вакцин началась с расшифровки структуры вирусных белков на источнике СИ в Шанхае (КНР)

RESEARCH ARTICLE

CORONAVIRUS

Structure-based design of antiviral drug candidates targeting the SARS-CoV-2 main protease

Wenhao Dai^{1,2,*}, Bing Zhang^{3,*}, Xia-Ming Jiang^{4,*}, Haixia Su^{1,5,*}, Jian Li^{1,6}, Yao Zhao³, Xiong Xie^{1,5}, Zhenming Jin³, Jingjing Peng^{1,5}, Fengjiang Liu³, Chunpu Li^{1,5}, You Li⁷, Fang Bai³, Haofeng Wang³, Xi Cheng¹, Xiaobo Cen⁷, Shulei Hu¹, Xiuna Yang³, Jiang Wang^{1,5}, Xiang Liu⁸, Gengfu Xiao⁴, Hualiang Jiang^{1,2,3,5}, Zihe Rao³, Lei-Ke Zhang⁴†, Yechun Xu^{1,5}†, Haitao Yang³†, Hong Liu^{1,2,5,6}†

SARS-CoV-2 (severe acute respiratory syndrome coronavirus 2) is the etiological agent responsible for the global COVID-19 (coronavirus disease 2019) outbreak. The main protease of SARS-CoV-2, M^{Pro}, is a key enzyme that plays a pivotal role in mediating viral replication and transcription. We designed and synthesized two lead compounds (11a and 11b) targeting M^{Pro}. Both exhibited excellent inhibitory activity and potent anti-SARS-CoV-2 infection activity. The x-ray crystal structures of SARS-CoV-2 M^{Pro} in complex with 11a or 11b, both determined at a resolution of 1.5 angstroms, showed that the aldehyde groups of 11a and 11b are covalently bound to cysteine 145 of M^{Pro}. Both compounds showed good pharmacokinetic properties in vivo, and 11a also exhibited low toxicity, which suggests that these compounds are promising drug candidates.

Потенциальные потребители:

ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, БИОКАД, АО «НПО» «Микроген», ФНЦИРИП им. Чумакова РАН» (Институт полиомиелита)

Энергетика и энергосберегающие технологии



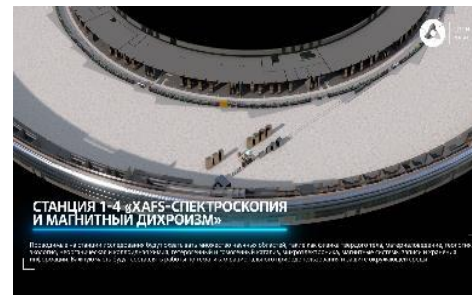
Цель: ускорить дизайн новых материалов для энергетики, включая ядерную и термоядерную, химические источники тока, топливные элементы, аккумуляторы.



Сервис СКИФ: установление эволюции материалов в условиях эксплуатации, включая экстремальные; создание биоподобных, в том числе, биоэнергетических и биосенсорных устройств



Оценка эффекта: промышленное производство новых функциональных материалов для традиционной и альтернативной энергетики.
Экономический эффект до 2 трлн руб.



XRD (РФА)

- Дальний порядок, фазовый состав, степень упорядочения, размер кристаллитов

SAXS
(МУРР)

- Информация о размерах и формах пор, фазовых сегрегаций и других неоднородностей с размерами в регионе 1-100 нм

XANES

- Электронная структура и зарядовое состояние атомов

EXAFS

- Локальное окружение исследуемого атома

XRF

- Элементный анализ

XPS
(РФЭС)

- Состояние атомов в приповерхностном слое

Новые эффективные катализаторы

Импортозависимость сегодня



100%

Полимеризация
(полиолефины)



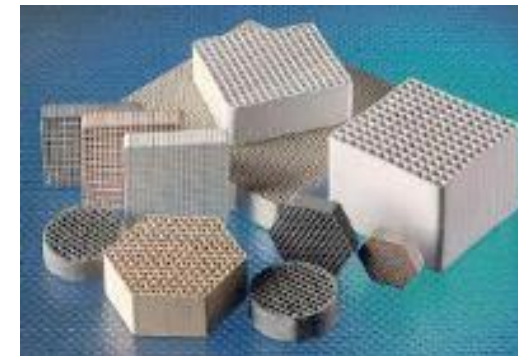
60-70%

Нефтепереработка



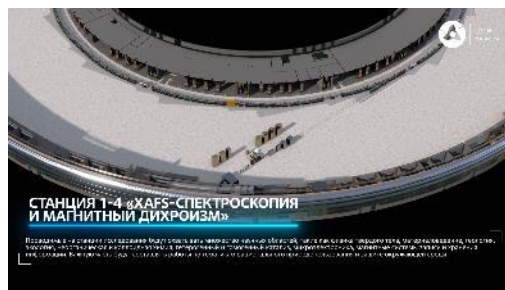
90%

Азотная
промышленность



Научная инфраструктура

Комплекс из трех экспериментальных станций со
взаимно комплиментарными возможностями



XRD (РФА)

- Дальний порядок, фазовый состав, степень упорядочения, размер кристаллитов

SAXS
(МУРР)

- Информация о размерах и формах пор, фазовых сегрегаций и других неоднородностей с размерами в регионе 1-100 нм

XANES

- Электронная структура и зарядовое состояние атомов

EXAFS

- Локальное окружение исследуемого атома

XRF

- Элементный анализ

XPS
(РФЭС)

- Состояние атомов в приповерхностном слое

Новое в самолетостроении



Цель: переход от заклепочных соединений на сварные



Сервис СКИФ: построение информационной модели сварного шва на атомном уровне в зависимости от параметров лазерной сварки; рациональная оптимизация технологии сварки



Оценка эффекта: стоимость фюзеляжа самолета ~100 млн.\$; переход на лазерную сварку снижает стоимость изготовления на 25%
Производство самолетов в России: 12 шт. в 2021 г.
Самолетный флот России 800 судов (около 40 000 в мире)

Мягкая революция в самолетостроении



Потенциальные потребители:

ОАК, Вертолеты России

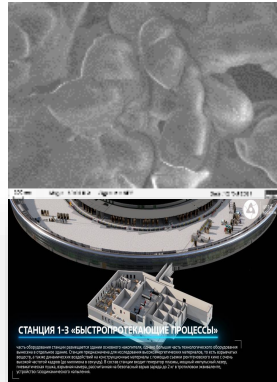
Научные партнеры:

ИТПМ СО РАН

Специальные и оборонные задачи

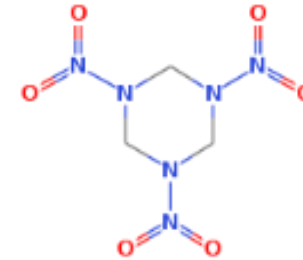


Направления



Горение
топлива

Ударопрочность
конструкционных
материалов



Новые
безопасные
энергетические
материалы

Инфраструктура



СТАНЦИЯ 1-3 «БЫСТРОПРОТЕКАЮЩИЕ ПРОЦЕССЫ»

часть оборудования станции размещается в здании основного накопителя, однако большая часть технологического оборудования вынесена в отдельное здание. Станция предназначена для исследования высокоэнергетических материалов, то есть взрывчатых веществ, а также динамических воздействий на конструкционные материалы с помощью съемки рентгеновского кино с очень высокой частотой кадров (до миллиона в секунду). В состав станции входит генератор плазмы, мощный импульсный лазер, пневматическая пушка, взрывная камера, рассчитанная на безопасный взрыв заряда до 2 кг в тротиловом эквиваленте, устройство газодинамического напыления.

Формирование пояса внедрения вокруг ЦКП «СКИФ»



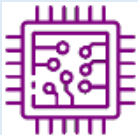
**Ускоренная разработка
лекарств и вакцин**



**Ферменты и
биотех-продукция**



**Зеленая химия
и энергетика**



**Инженерные
материалы и
технологии**



ГНЦ ВБ «ВЕКТОР»



СИБИРСКИЙ КОЛЬЦЕВОЙ
ИСТОЧНИК ФОТОНОВ



N* Новосибирский
государственный
университет
***НАСТОЯЩАЯ НАУКА**

ЦК НТИ
**«Технологии
моделирования и
разработки новых
функциональных
материалов с
заданными
свойствами»**



БИОКАТТЕХ



Институт катализа

ЦК НТИ
**«Водород как
основа
низкоуглеродной
экономики»**



**ИНСТИТУТ
ЦИТОЛОГИИ И
ГЕНЕТИКИ**

**ЦКП «Центр генетических
технологий»**



**ЦКП «Опытное производство
катализаторов»**

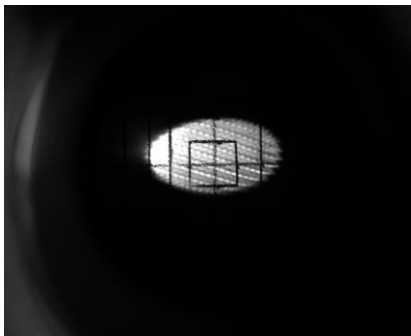
Станции первой очереди

- 1) **«Микрофокус» (14.4-35 кэВ)** – исследование биомакромолекул, магнитных материалов и вещества, в т.ч. в экстремальных условиях, неразрушающая томография микро- и наносистем;
- 2) **«Структурная диагностика» (5-35 кэВ)** – широкий спектр исследовательских и технологических задач, решаемых методами рентгеновской дифракции;
- 3) **«Быстропротекающие процессы» (15-100 кэВ)** – исследования с высоким временным разрешением при высоких температурах и давлениях, изучение воздействия ударных, детонационных волн, лазерного излучения и т.п.;
- 4) **«XAFS-спектроскопия и магнитный дихроизм» (2.5-35 кэВ)** – исследование локальной пространственной, электронной и магнитной структуры кристаллических и аморфных материалов, молекулярных кристаллов, жидкостей и газов, а также тяжелых элементов (с содержанием до 0.001%) в биологической матрице;
- 5) **«Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне» (30-150 кэВ)** – высококонтрастные изображения с малым пространственным разрешением в жестком рентгеновском диапазоне для медицины, материаловедения, археологии и палеонтологии;
- 6) **«Электронная структура» (0.02-1.9 кэВ)** – исследование электронных свойств и химического состава поверхности широкого класса функциональных материалов (катализаторы, углеродные материалы, полупроводниковые структуры, многослойные покрытия, тонкие плёнки и другие).

Содержание

- 
- Синхротронное излучение и источники СИ
 - Источник СИ поколения 4+ ЦКП «СКИФ»
 - Общая информация
 - Ускорительный комплекс
 - Экспериментальные станции
 - **Статус проекта на апрель 2023 года**

Статус создания ускорительного комплекса



Изображение первого пучка СКИФ на люминофоре

В соответствии с планами контрактов

- 😊 17.02.2022 ИК СО РАН передана первая партия оборудования для ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ» (высокочастотные усилители мощности).
- 😊 В июле 2022 начата крупноблочная сборка оборудования инжекционного комплекса.
- 😊 25 октября 2022 г. состоялся запуск части линака (до 20 МэВ).
- 😊 На конец марта 2023 г. готовность оборудования инжектора составляла более 90%, основного накопителя более 48%
- ! Начиная с марта 2022 года, ряд зарубежных компаний отказались от поставки оборудования и материалов для ЦКП «СКИФ», включая мощные клистроны (Canon, Япония), источники питания магнитов (Danfysik, Дания), медные проводники (Luvata, Финляндия), электротехническая сталь (TyssenKrupp, Германия), электроника (Libera, Словения), вакуумные компоненты (VAT, Швейцария) и др.

Пути решения проблем с изготовлением ускорительного оборудования

✓ Изменение логистических схем.

Удалось наладить через посредников поставку электротехнической стали ThyssenKrupp из Германии. Словенская компания CosyLab перенесла разработку системы управления для ЦКП «СКИФ» в Китай.

✓ Поиск аналогов в дружественных или нейтральных странах.

В Китае был найден поставщик медных проводников для магнитов.

✓ Разработка и производство собственными силами.

Конкретные решения и задачи

- ✓ С марта 2022 в ИЯФ СО РАН начато изготовление прототипов высокочастотных клистронов-генераторов (3 ГГц, 50 МВт), мощных импульсных модуляторов, источников питания электромагнитов, вакуумных элементов (шиберов, сильфонов и т.д.) и других компонентов ускорительного комплекса ЦКП «СКИФ».
- ✓ Для налаживания новых логистических схем и для разработки и производства своими силами недостающих компонентов и систем понадобится приблизительно один год. По современному состоянию можно оценить срок сдачи синхротрона-бустера и одной станции синхротронного излучения, как **декабрь 2023 года**, а срок сдачи источника синхротронного излучения поколения 4+, как **декабрь 2024 года**.



Катод клистрона



Высоковольтное оборудование источника питания



Пролетная трубка



Импульсный трансформатор модулятора

Статус создания экспериментальных станций: 1-3 Быстропротекающие процессы

Контракт #1
от 12.08.2022 №1269/22/УД

Контракт #2
от 29.07.2022 №1046/22/УД



Завершено эскизное проектирование, идет разработка рабочей конструкторской документации, заключены субподрядные контракты



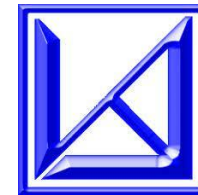
ИГиЛ СО РАН – интегратор



КТФ ИГиЛ СО РАН
(взрывная камера)



РФАЦ-ВНИИТФ
(легкогазовая пушка)



ИАиЭ СО РАН
(АСУ ТП)



КТИ НП
СО РАН
(щели)



ИЯФ СО РАН
(детекторы)



ИХТТМ
СО РАН
(оптика)

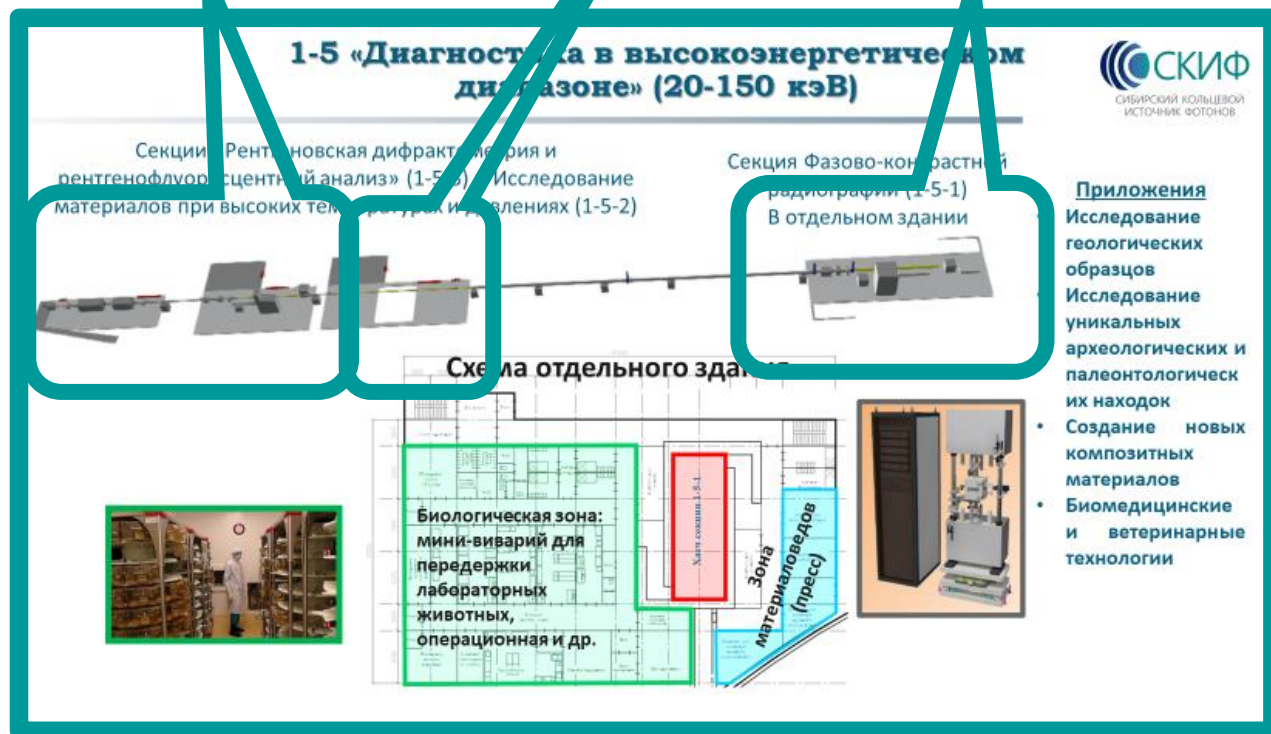
Статус создания экспериментальных станций:

1-5 Диагностика в высокоэнергетическом рентгеновском диапазоне

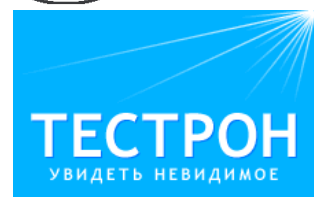
Контракт #3
от 19.08.2022 №1280/22/УДД

Контракт #5
от 25.08.2022 № 1331/22/УД

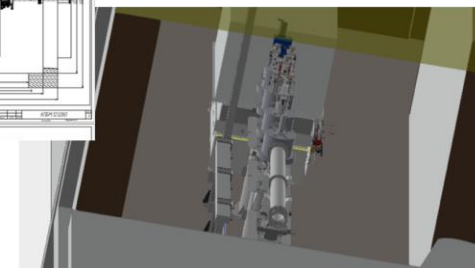
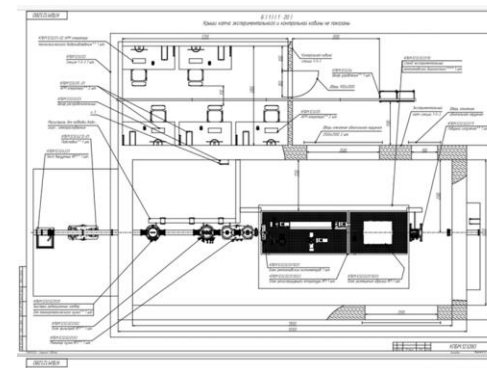
Контракт #4
от 19.08.2022 №1281/22/УД



КТИ НП СО РАН - интегратор



ООО «Катод»



Завершено эскизное проектирование, идет разработка рабочей конструкторской документации, заключены субподрядные контракты

Статус создания экспериментальных станций:

1-1 Микрофокус

Контракт #6
от 09.11.2022 №1850/22/УД



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

ТПУ - интегратор



Институт геологии
и минералогии им.
В.С. Соболева

(система образца и камеры
высокого давления)



Институт физики микроструктур
РАН (многослойная зеркальная
оптика)



БФУ имени
И. Канта

(составные преломляющие
линзы и трансфокаторы на их
основе)



**НГТУ
НЭТИ**

(монохроматор, системы
позиционирования)

ООО «Эрэнди Вакуум» (вакуумные компоненты)

1-1 «Микрофокус» (5-47 кэВ)



Секция 1-1-1 «Высокоэнергетическая
когерентная дифракционная
микроскопия»

дифракционная микроскопия, птихография,
гомотомография, 3D картографирование
элементного и фазового состава, дифракция в
условиях высокого давления



Секция 1-1-3
«Макромолекулярная
кристаллография»

Сверхъяркие частично
когерентные
рентгеновские пучки
субмикронного сечения

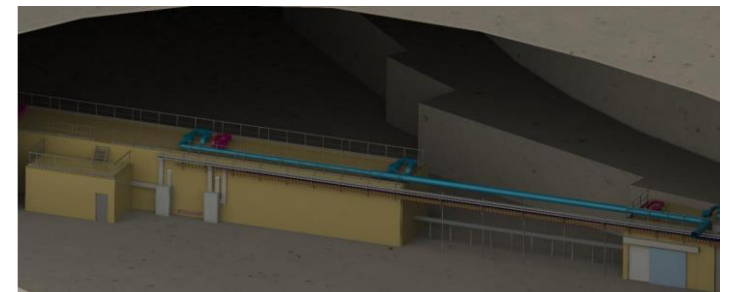
Приложения

- Науки о Земле
- Планетология
- Структурная биология
- Машиностроительное материаловедение
- Физика экстремального состояния вещества
- Микроэлектроника

Двухзеркальный
монохроматор
(разработка ИФМ РАН)

Алмазные
монохроматоры-
сплиттеры (совместная
разработка ТИСНУМ, ИГМ
СО РАН, Нью Даймонд
Технолоджи, ООО
«Кристаллин»)

Секция 1-1-4 «Ядерный
гамма-резонанс»
(Мёссбауэровская
спектроскопия на ядрах ^{57}Fe –
NFS, NIS)



Завершено эскизное проектирование, начата разработка
конструкторской документации, заключены субподрядные контракты

Статус создания экспериментальных станций:

1-2 Структурная диагностика

Контракт #7
№40/23/УД от 30.01.2023



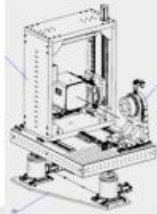
ИСЭ СО РАН - интегратор

1-2 «Структурная диагностика» (5-40 кэВ)



Универсальный дифрактометр:

- порошки
- монокристаллы
- режим высокого углового разрешения
- in situ/operando



Приложения

- Водородная энергетика, топливные элементы
- Катализ
- Керамика, энергетические материалы
- Пленки и мембраны
- Полимеры и углеродные материалы
- Новые фармацевтические материалы и лекарственные формы
- Высокодисперсные материалы
- Наноматериалы

Монокристалльный
монокристалл

Оптический хатч

Составные
преломляющие
линзы
(разработка БФУ)



ТОМСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ



НГТУ
НЭТИ



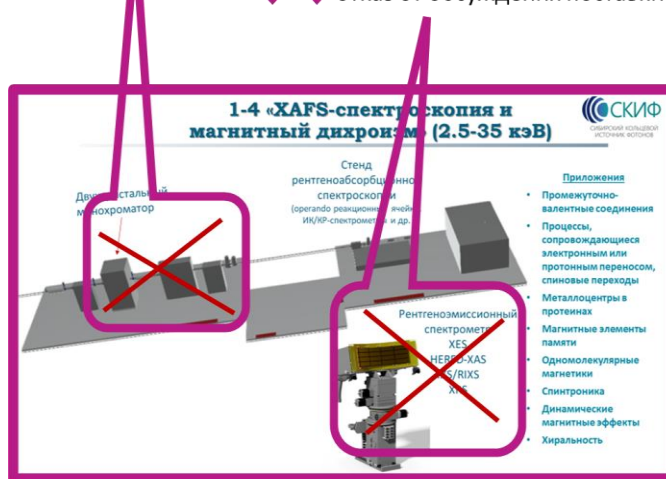
К защите подготовлен эскизный проект. Прорабатываются список партнеров и субподрядчиков

Экспериментальные станции (1-4) и (1-6)

Проблемы с приобретением станций 1-4 и 1-6 и предлагаемые пути решения

✗ FMB Oxford (Великобритания), отказ от обсуждения поставки

✗ JJ Xray (Дания), отказ от обсуждения поставки



✗ FMB Berlin (Германия), отказ от обсуждения поставки

✗ SPECS GmbH (Германия), отказ от обсуждения поставки

СЦЕНАРИИ решения проблемы:

- ✓ Поиск путей поставки (параллельный импорт) – до 03.2023 г.
- ✓ Станции упрощенного дизайна на поворотных магнитах с похожим функционалом: низкая стоимость и короткий срок создания, возможность включения единиц оборудования из действующих станций ВЭПП-3/ВЭПП-4, реализация базовых методик, простота и надежность эксплуатации.

Станция 1-7 «EXAFS и дифракция» Базовые методы синхротронной диагностики для образовательной, исследовательской и инновационной деятельности студентов НГУ



Станция 1-8 «Метрология и спектроскопия мягкого рентгеновского диапазона»



Для создания двух дополнительных станций необходимо дополнительное финансирование в объеме 200-300 млн. руб.

(фронты, хатчи, вакуумные системы, системы управления)

Важно!

Конечный срок изготовления как первых четырех станций, так и двух упрощенных (всего шесть) – конец 2024 года, что позволяет перейти в 2025 году к пробной эксплуатации ЦКП «СКИФ»

Закладка первого камня



Наукоград Кольцово
25.08.2021

Объект капитального строительства

В соответствии с ПСД, получившей положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России»



~30 га
общая площадь земельного участка

34 здания и сооружений

86,8 тыс. кв.м
общая площадь проектируемых зданий

12 МВ·А присоединенная эл.мощность

47,27 млрд. рублей бюджет объекта

44,46 млрд. рублей **94%** заcontractовано

21,27 млрд. рублей **45%** - расходы

декабрь 2024
срок реализации проекта

Общий вид строительной площадки ЦКП «СКИФ» на 11.04.23



Заключение

- Несмотря на сложности, проект ЦКП «СКИФ» успешно развивается. Санкции, хотя и вызывают определенные трудности, не приводят к критическим последствиям.
- СКИФ, с его рекордными параметрами, может и должен придать новый импульс исследовательским работам в области физики, химии, катализа, материаловедения, биологии, геологии, вирусологии и т.д. в СО РАН и в РФ, в целом.
- СКИФ, с его исследовательским потенциалом и возможностями «карьерного» роста, может и должен стать центром подготовки научных кадров (опираясь на ВУЗы Сибири), центром «притяжения» молодых ученых, генерации и реализации новых идей в широком спектре экспериментальных направлений.