

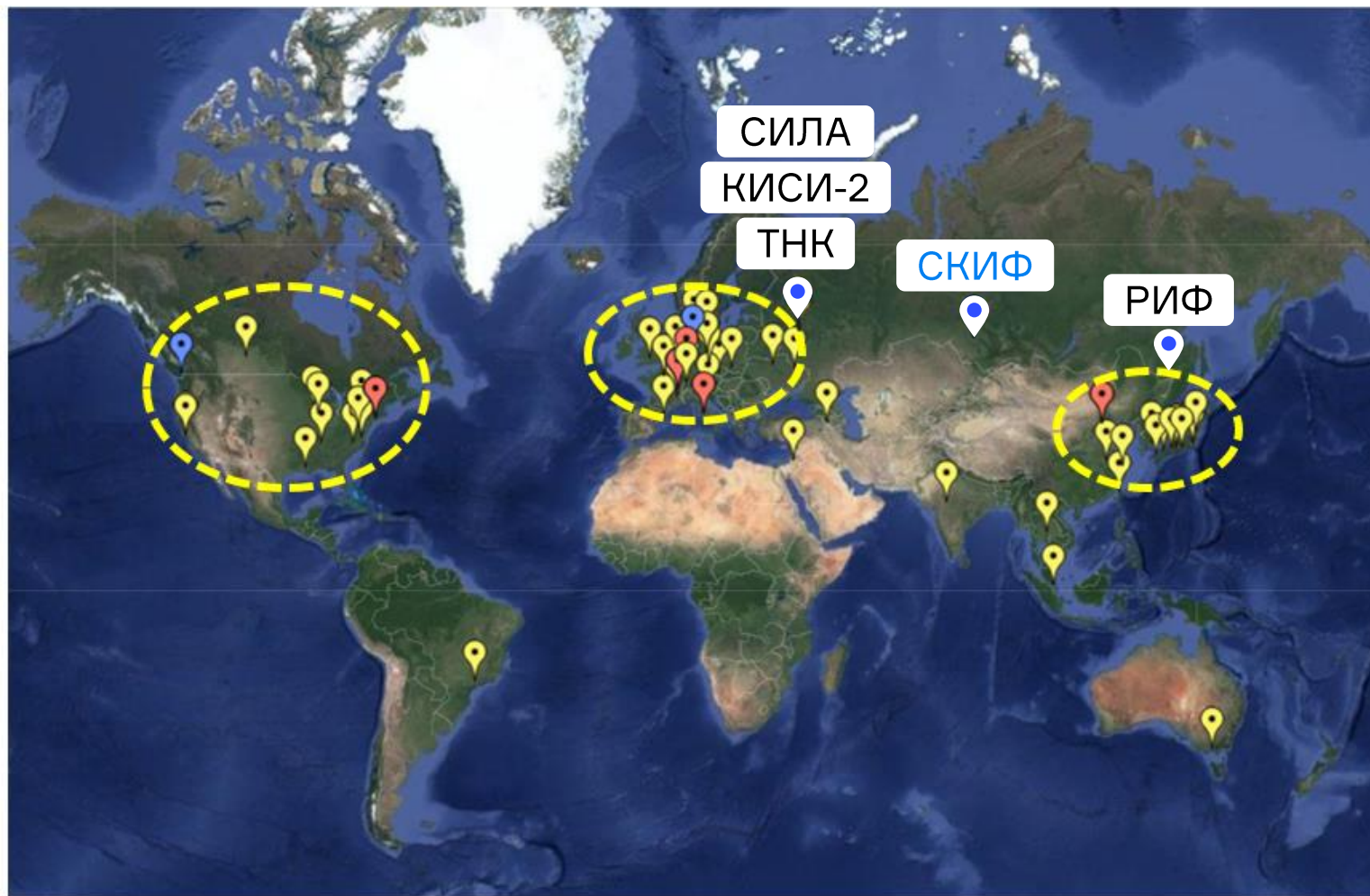
STATUS OF THE NOVOSIBIRSK FOURTH-GENERATION LIGHT SOURCE SKIF



G. Baranov on behalf
of the team

16.09.2024

Лаборатории СИ в мире



Области с высокой концентрацией источников СИ = наиболее технологически развитые регионы мира

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 (КИСИ, CAMD, DELTA, SAGA, ANKA, ...)
3. Спец. накопители, эмиттанс оптимизирован, излучение из ондуляторов. $\epsilon_x \sim 1-10$ нм (ALS, ESRF, Diamond, Alba, ...)
4. Спец. Эмиттанс предельно оптимизирован. $\epsilon_x \sim 500-100...10$ пм (MAX IV, ESRF-EBD, Sirius, «СКИФ», СИЛА...).

СКИФ. Начало проекта

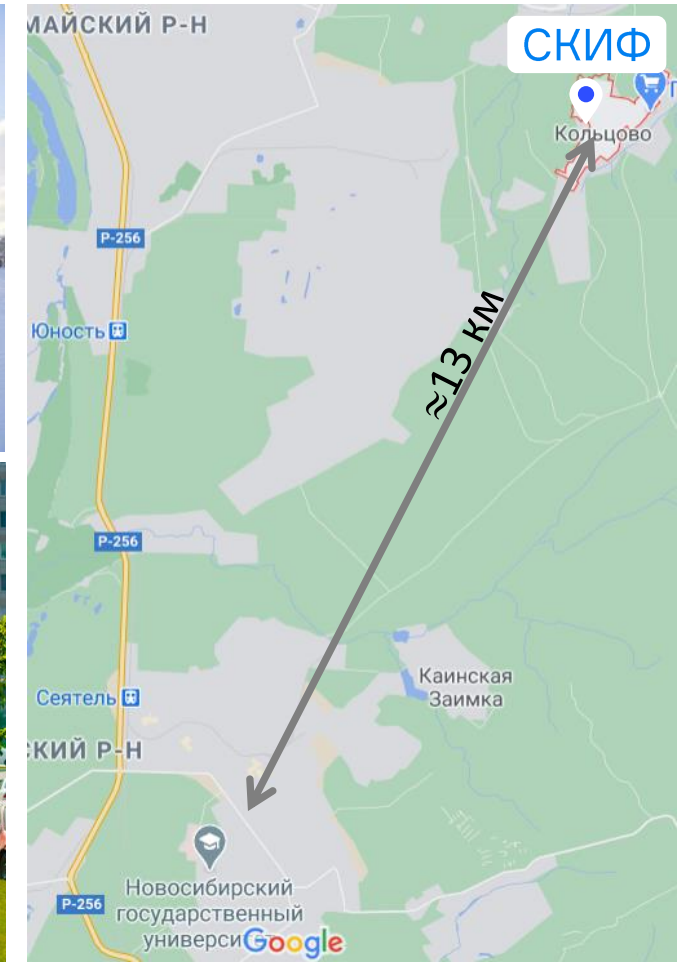
В феврале 2018 г. В.В. Путин утвердил создание в Новосибирске новейшего источника синхротронного излучения ЦКП «СКИФ» (Центр коллективного пользования «Сибирский Кольцевой Источник Фотонов»).



8 февраля 2018 г., ИЯФ СО РАН, Новосибирск.

Локация — наукоград Кольцово

- Участок земли
- Энергетические мощности
- Индустриально тихий район (микросейсмика)
- Био-технопарк
- ГНЦ «Вектор»
- Комфортная среда
- Транспортная доступность (Академ, Новосибирск)

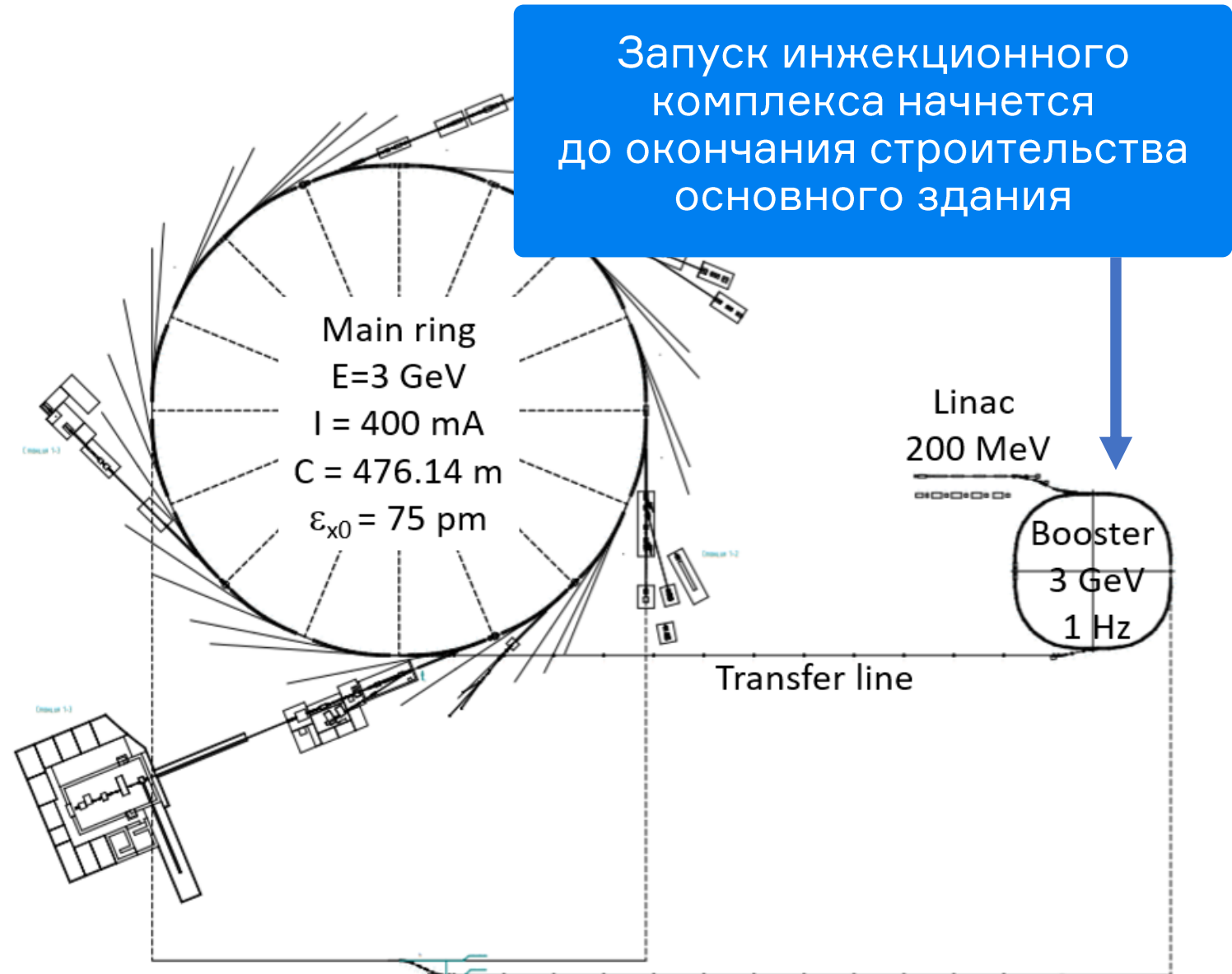


Требования к ускорительному комплексу

- Энергия пучка 3 ГэВ
- Периметр < 500 м
- Натуральный эмиттанс $\leq 100 \text{ pm}$
- Инжекционный комплекс: 150-200 МэВ линак, бустер на полную энергию
- Классическая схема инжекции (top-up инжекция)
- Достаточное количество выводов излучения:
 - Из вигглеров и ондуляторов (прямолинейные промежутки)
 - Жесткое рентгеновское излучение из сильнополевых магнитов (2.1 Тл)
 - Мягкий рентген из обычных поворотных магнитов

Конфигурация

- Линейный ускоритель на энергию 200 МэВ
- Синхротрон — бустер на полную энергию (3 ГэВ) с периметром 158.7 м
- Накопительное кольцо на энергию 3 ГэВ и периметром в 476 м



Санкции и их преодоление

Санкции существенно задержали и осложнили выполнение проекта (клистрон, источники питания, медь, электротехническая сталь, инженерное оборудование и т.д.)

Преодолели с помощью:

- изменения логистических схем
- аналогов из дружественных или нейтральных стран
- разработки и производства в РФ

Государственная премия Новосибирской области присуждена за создание оборудования для СКИФа

13.06.2024

Государственной премии Новосибирской области удостоился научный коллектив Института ядерной физики им. Г.И. Будкера Сибирского отделения Российской академии наук — за разработку клистрона для источника синхротронного излучения «СКИФ».

В ИЯФ СО РАН создан высокочастотный клистрон с частотой 3 ГГц и мощностью 50 МВт



Клистроны

Необходимо 3 клистрона

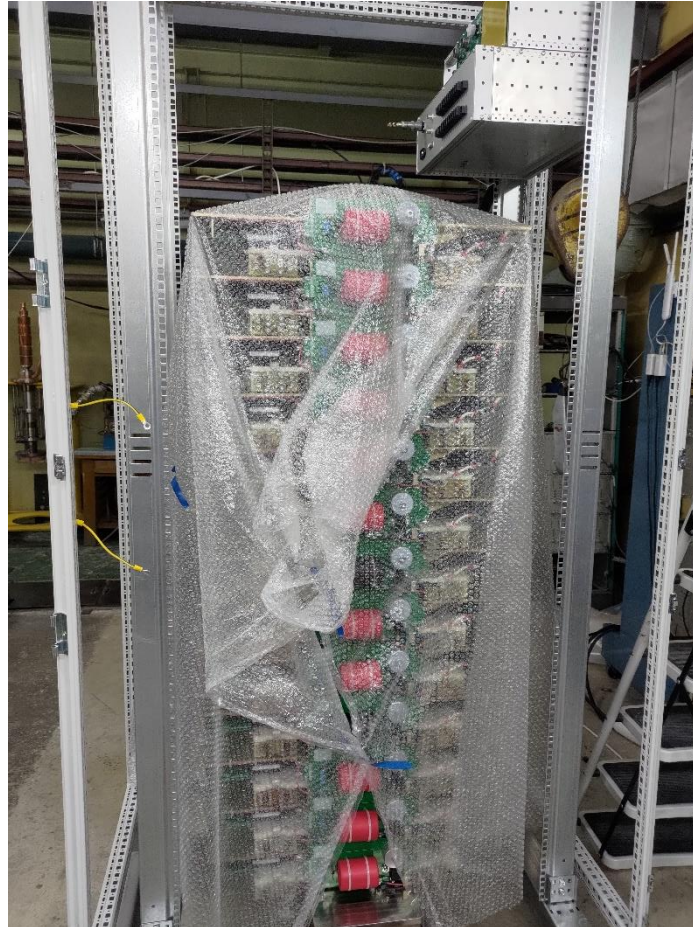
В наличии:

- 1 клистрон Thoshiba.
- 1 клистрон ИЯФ СО РАН.
- 1 клистрон ИЯФ СО РАН.

проходит испытания.

- 1 клистрон ИЯФ СО РАН предсерийный в запасе.

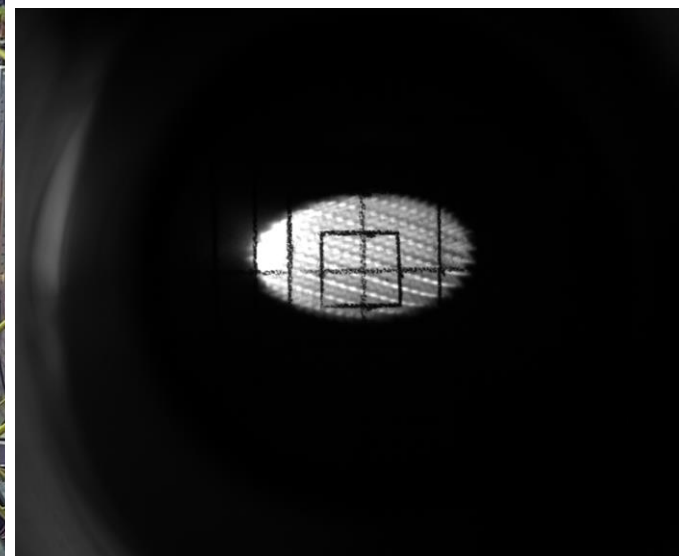
На данный момент всё выглядит так, что к моменту запуска линака необходимые клистроны будут готовы.



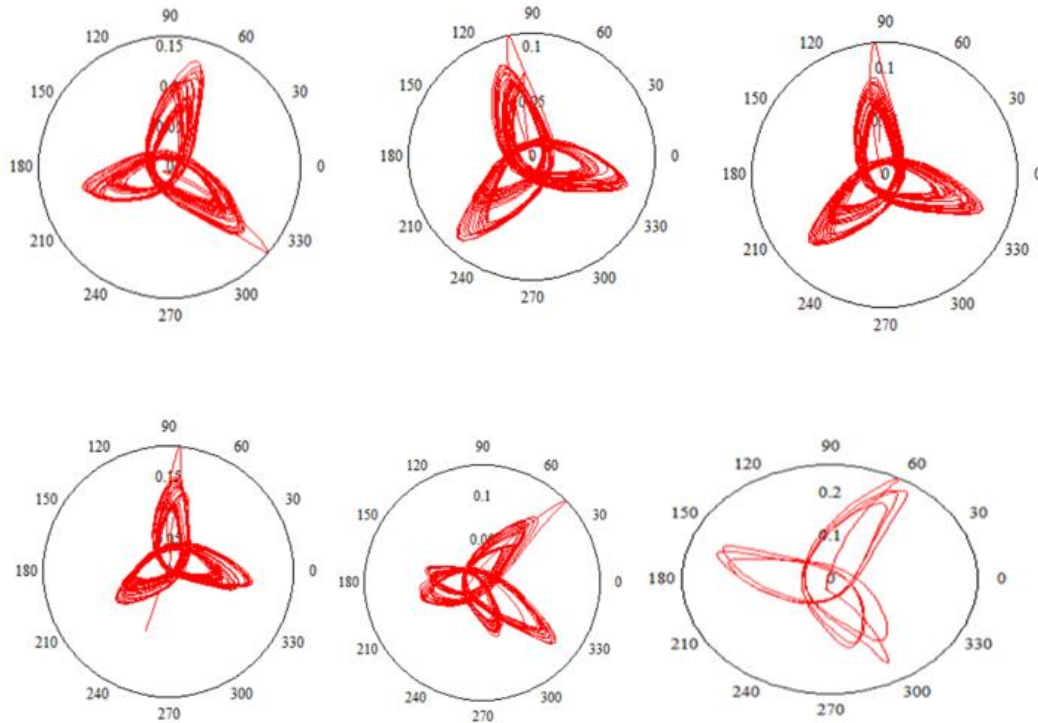
Первая секция линейного ускорителя (30 МэВ)



Октябрь 2022 — получен первый пучок из линака СКИФ.



Ускоряющие структуры



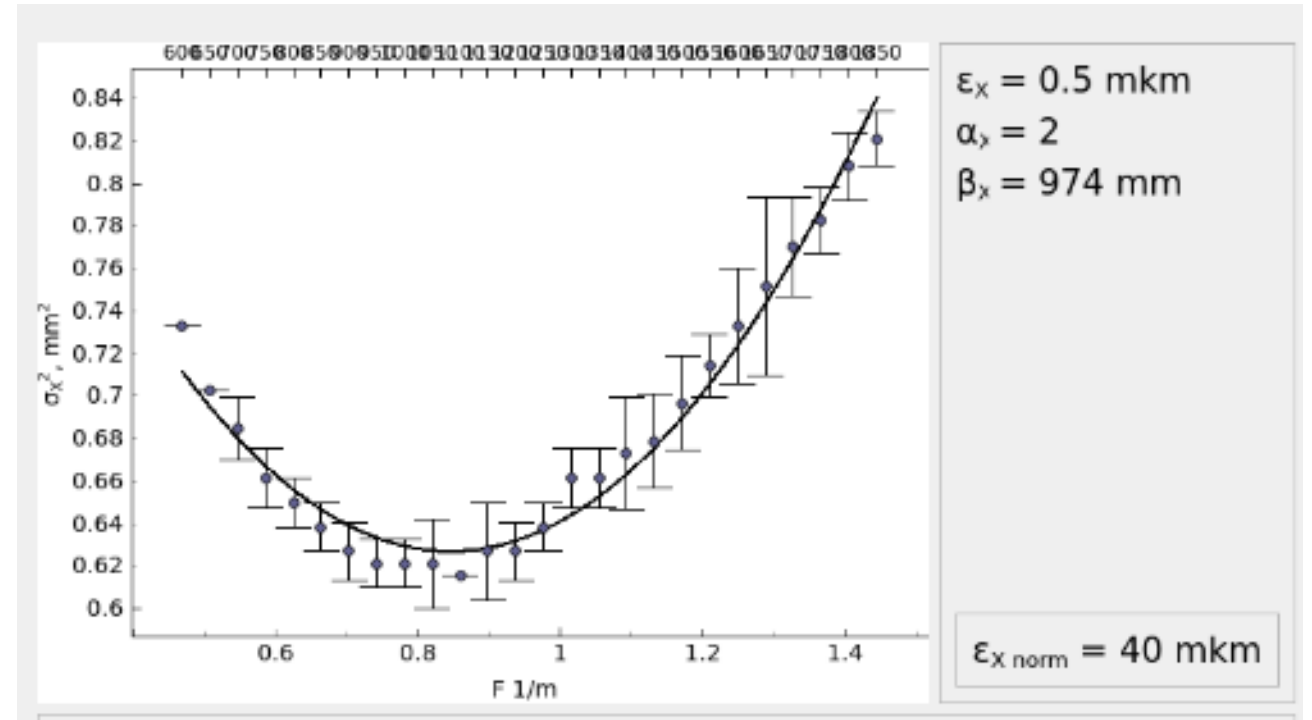
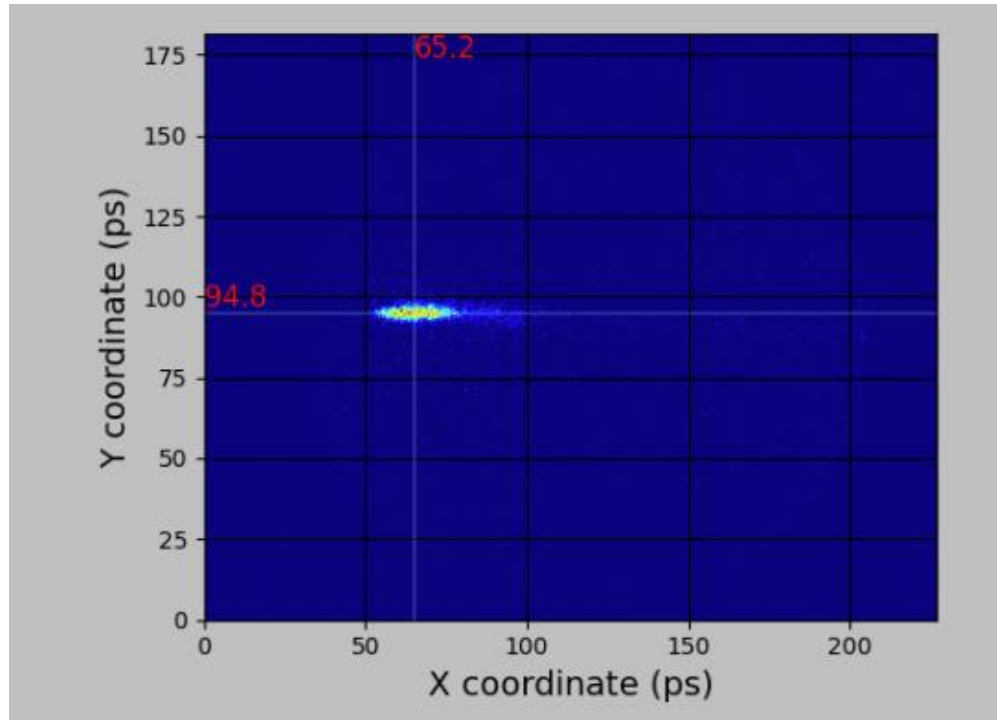
Фазовые диаграммы ускоряющих структур

Верхний ряд слева-направо: структура №1, №2, №3 соответственно. Нижний ряд слева направо: структура №4, №5, предускоритель-группирователь

Все структуры изготовлены!

№ структуры	Рабочая частота при вакууме и рабочей температуре, МГц	Рабочая температура, °С	Суммарная ошибка фазы на структуру по модулю менее	RMS фазовое отклонение	Отражение по мощности
1	2856	36	0.8°	±1.2°	3%
2	2856	27	2.5°	±1.7°	2.5%
3	2856	31	0.9°	±1.5°	3%
4	2856	30	1.9°	±2.4°	2.4%
5	2856	36	1.7°	±4°	5%
Предускоритель-группирователь	2856	31	2°	±3°	3%

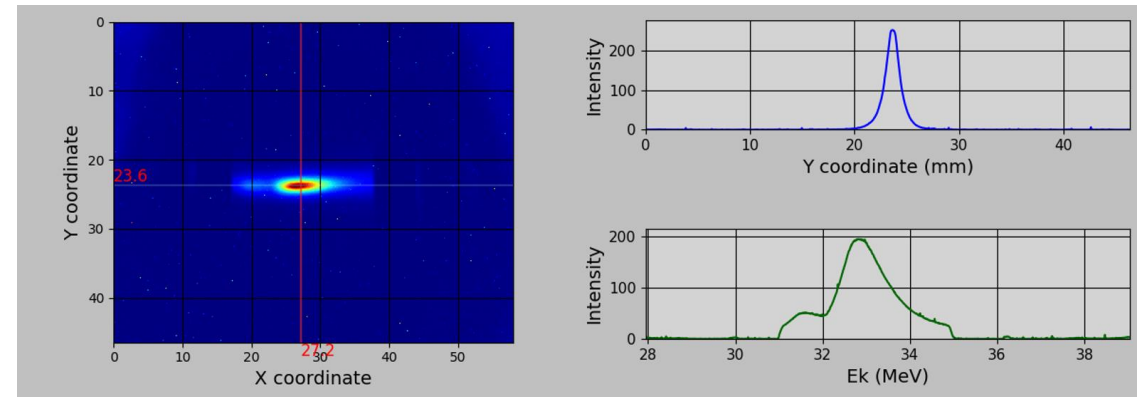
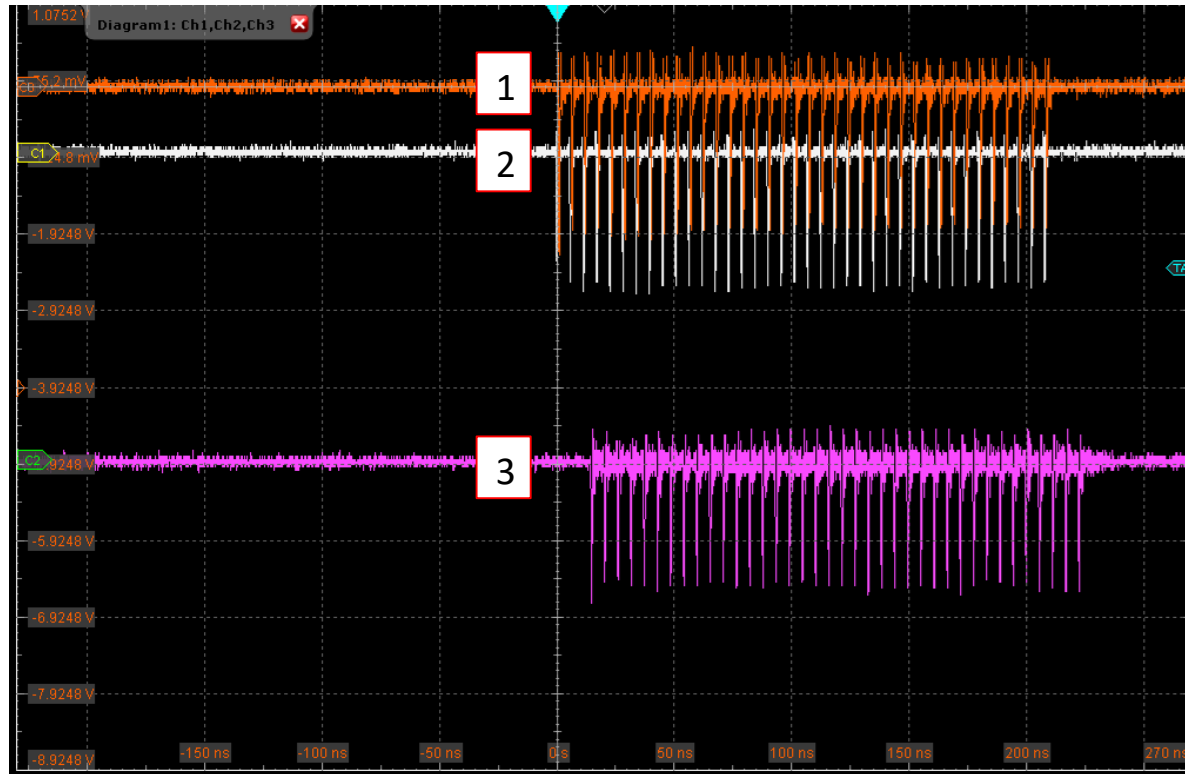
Параметры пучка



Пучок на стрик-камере после ускорения.
Длительность 18 пс

Достигнутый лучший нормализованный эмиттанс 40 мкм, что должно обеспечить 100 нм геометрического эмиттанса при энергии 200 МэВ (необходимый по ТЗ 150 нм)

Многосгустковый режим



Пучок на спектрометре в многосгустковом режиме

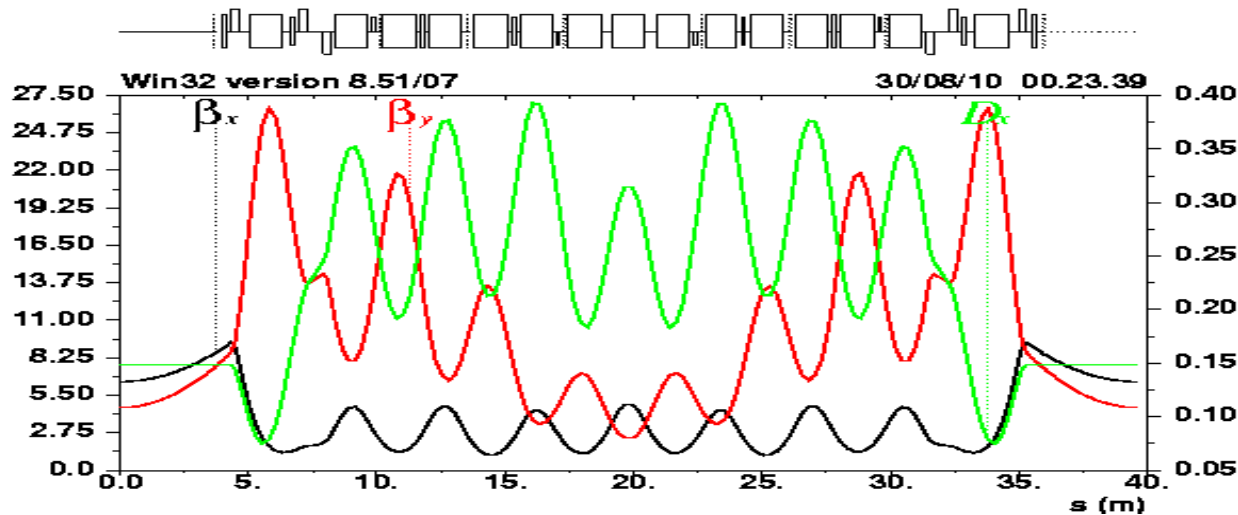
38 сгустков электронов после ускоряющей структуры:

- 1 — сигнал FCT после пушки,
- 2 — сигнал FCT перед предускорителем-группирователем,
- 3 — сигнал FCT после ускоряющей структуры

Бустер-синхротрон «СКИФ»

Параметры впускаемого пучка

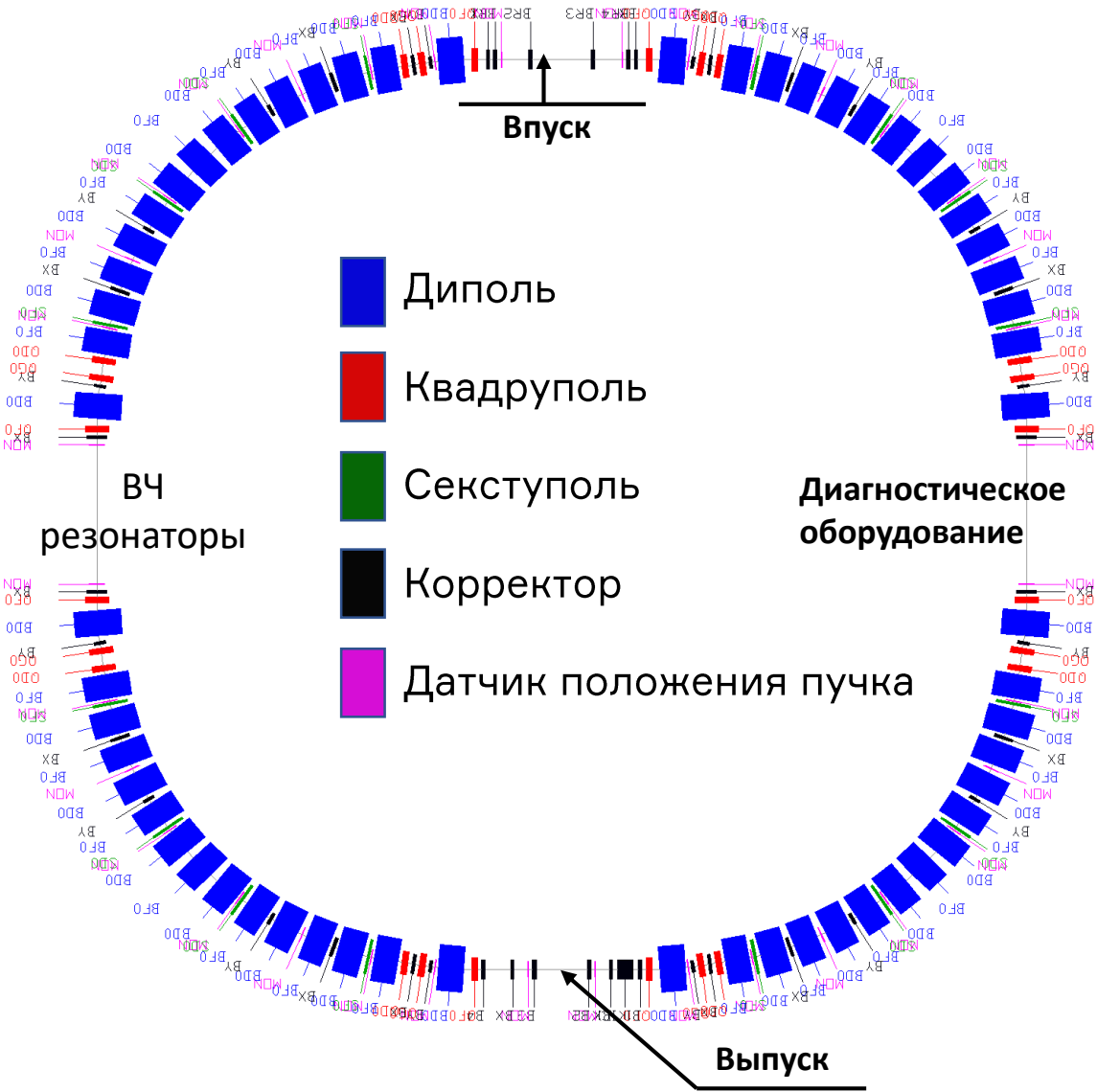
Линейный ускоритель	
Эмиттанс ($4\sigma_x\sigma_x'$), нм-рад	150
Энергетический разброс σ_E/E	$<1\cdot 10^{-2}$



Энергия	200 MeV	3 GeV
Число периодов	4	
Периметр кольца, м	158.71	
Частота повторения, Гц	1	
Число сгустков	1 - 55	
Период обращения, нсек	529	
ВЧ частота, МГц	357	
Число сепаратрис ВЧ	189	
Бетатронные частоты ν_x / ν_y	9.645 / 3.41	
Натуральный хроматизм ξ_x / ξ_y	-9.5 / -13.5	
Остаточный хроматизм ξ_x / ξ_y	1.25 / 2.05	
Коэфф. Уплотнения орбит, α	0.00838	
ВЧ напряжение, МВ	0.2	1.2
ВЧ акцептанс, ε_{RF} , %	1.65	0.54
Продольный размер пучка, мм	0.76	19.8
Гор. эмиттанс ε_x , нм-рад	0.166	37.4
Энергетический разброс, σ_E/E	$0.55\cdot 10^{-4}$	$8.23\cdot 10^{-4}$
Потери на оборот USR, кэВ	0.0135	686
Время затухания (τ_x, τ_y, τ_s)	(15.6, 15.6, 7.8)s	(4.62, 4.62, 2.31)ms

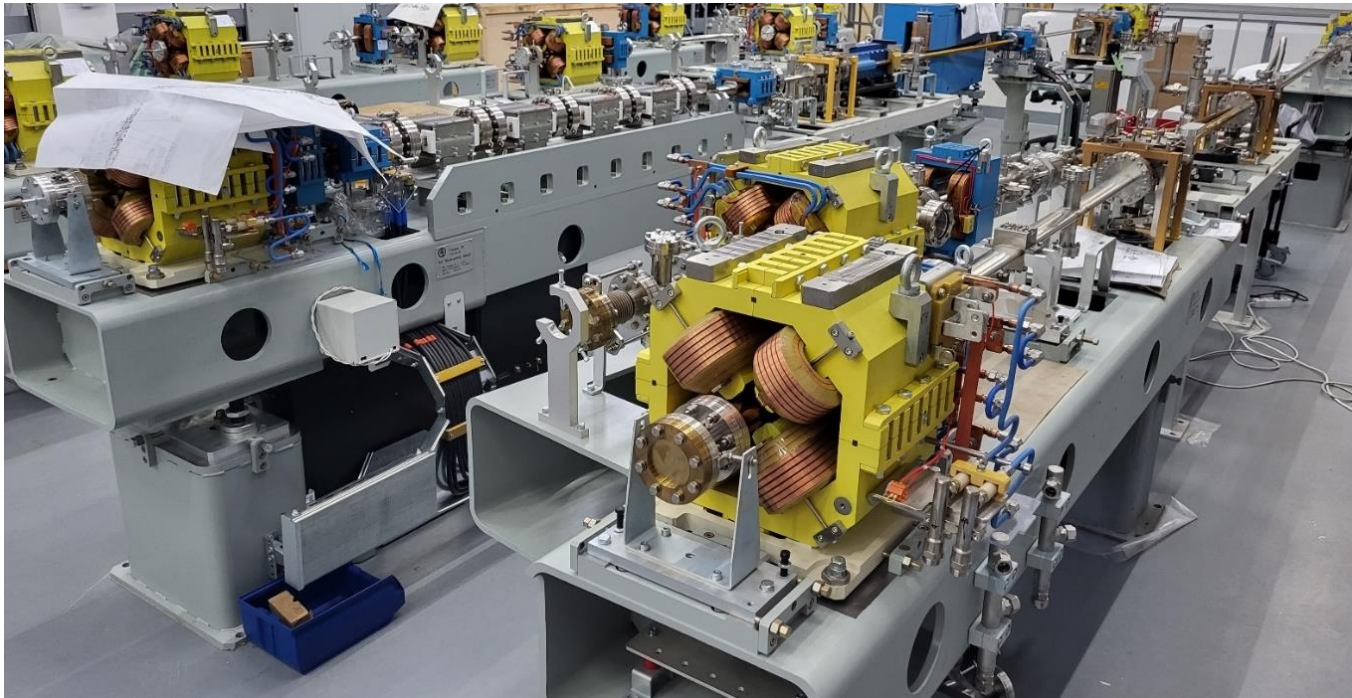
Основные системы бустера «СКИФ»

Система	Конструирование	Материалы	Изготовление	Тестирование
Магнитная система	✓	✓	✓	✓
Источники питания	✓	✓	✓	✓
Вакуумная система	✓	✓	✓	✓
Диагностическая система	✓	✓	✓	✓
Подставки&Гирдеры	✓	✓	✓	✓

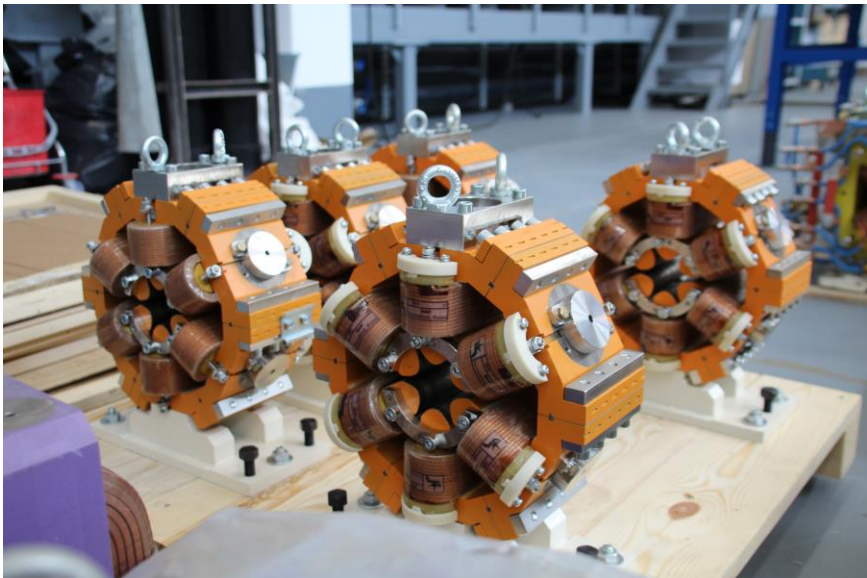
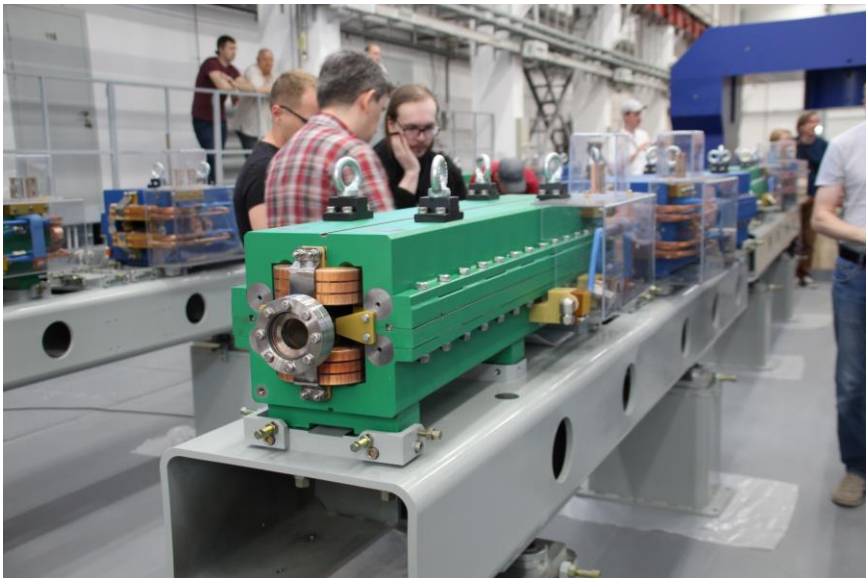
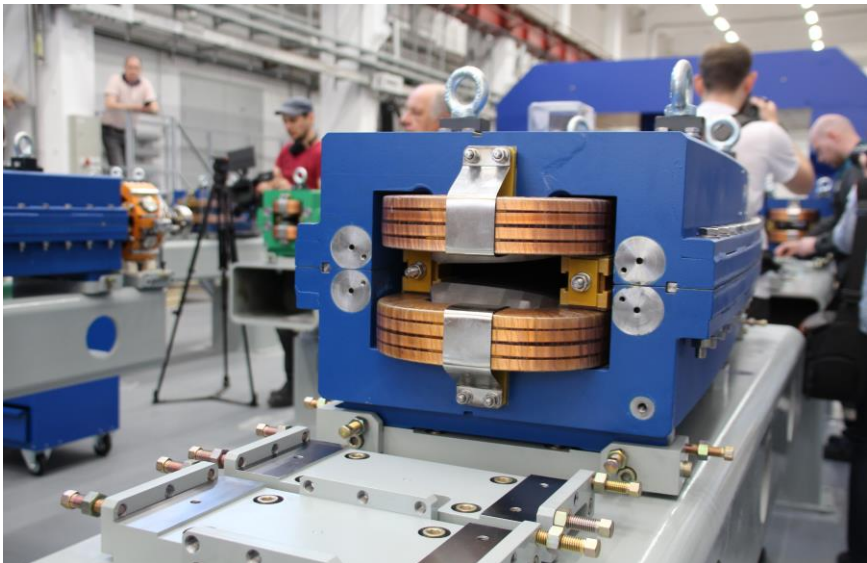
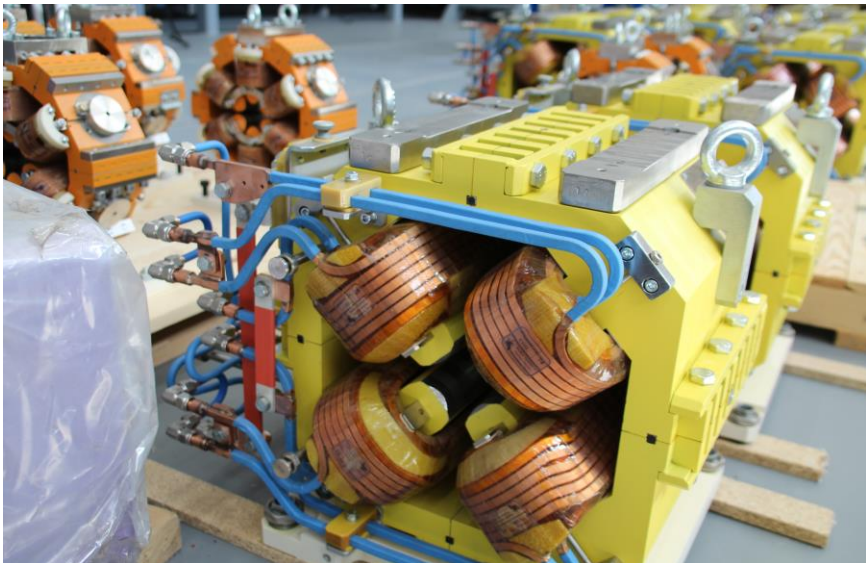


Оборудование бустера-синхротрона (158 м, 3 ГэВ)

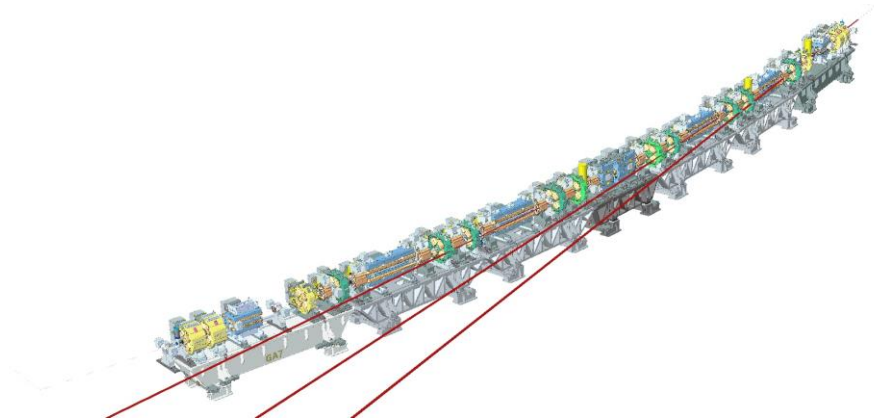
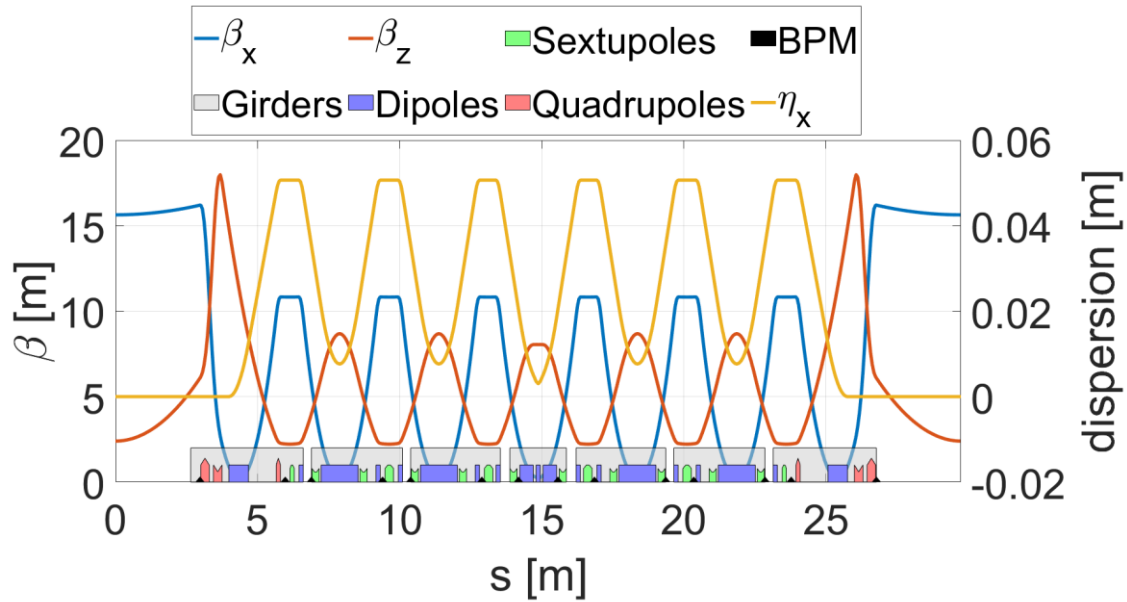
44 «гирдерные» сборки + сборки на подставках.
Основное производство закончено в 2022 г.
В 2023 г. крупноблочная сборка и упаковка.
В феврале 2024 г. сдан впуск-выпуска бустера.



Магнитные элементы



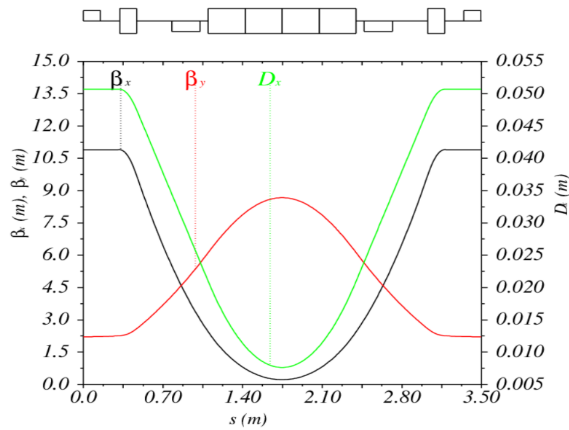
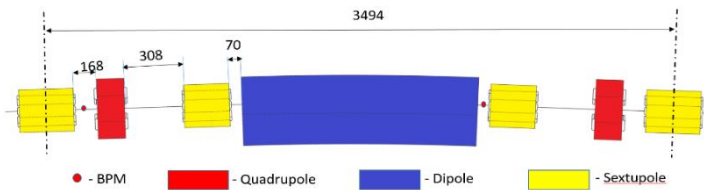
Структура накопительного кольца СКИФ



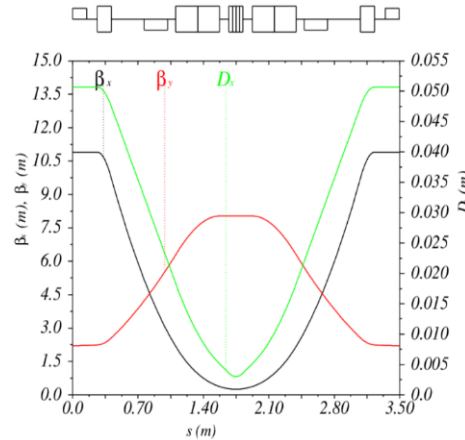
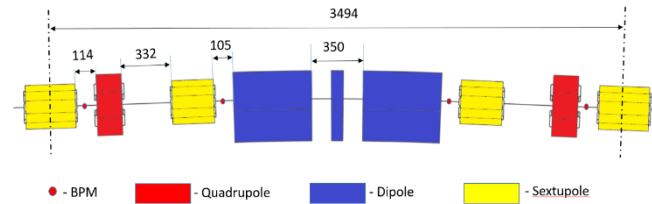
ПАРАМЕТРЫ КОЛЬЦА

Энергия	3 GeV
Периметр	476.14 м
Время оборота	1.59 μ с
Частота обращения, f_0	0. 62963 МГц
Коэффициент уплотнения орбит	$0.76 \cdot 10^{-4}$
Симметрия	16 DD
Эмиттанс	73 пм·рад
Энергетический разброс	$1.03 \cdot 10^{-3}$
Потери энергии/оборот	536 кэВ
Бетатронные частоты (x/y)	50.806/ 18.84
Натуральный хроматизм (x/y)	-149 / -55
Номер гармоники	567
Частота ВЧ	357 МГц
Напряжение ВЧ	0.77 МВ
Длина сгустка, σ_s	0.53 см
Напряжение ВЧ 3й гармоники	0.2 МВ
ВЧ акцептанс	2.59 %
Синхротронная частота	$1.13 \cdot 10^{-3}$
Декременты затухания (x/y/s)	1.94 / 1 /1.06
Время затухания(x/y/s)	9.2 / 17.7 /16.7 мс
Длина прямолинейных промежутков	6 м
Количество прямолинейных промежутков	16

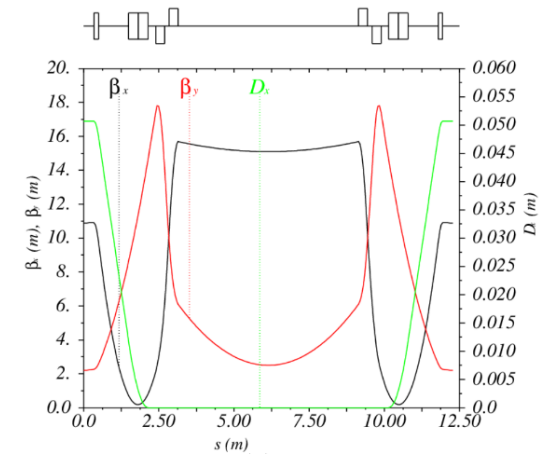
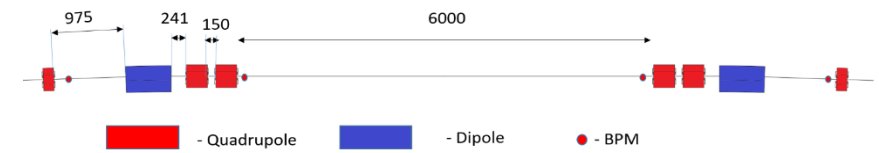
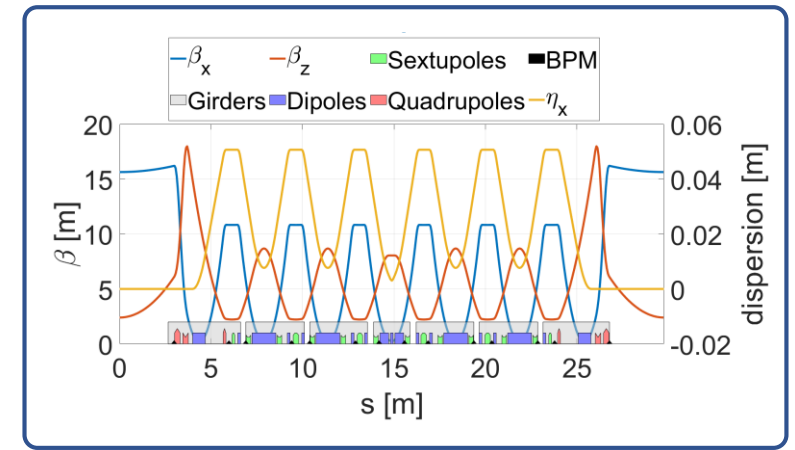
Структура накопительного кольца СКИФ



Диполь ≈ 0.5 Тл
Мягкий рентген



Диполь ≈ 2.1 Тл
Жесткий рентген



ПП под установку
вигглера\ондулятора

Магнитные элементы накопительного кольца СКИФ

Диполи		BMA	BDA	BDC	BPC
Магнитная длина L	м	0.69	1.3	0.47	0.15
R зазора магнита	мм	15	15	15	15
R вак. камеры внутренний	мм	13.5	13.5	13.5	13.5
B	Тл	0.526	0.553	0.4627	2.05
G	Тл/м	0	-7.919	-10.748	0
ΔB/B (R=10 mm)	%	±0.08	±0.03	±0.03	±0.03
Коррекция	%	1	1	0	1
Количество общее/изготовлено/изменено	шт	32/2/2	64/64/64	32/32/32	16/2/2

Квадруполи		QFA / QDA		QFI/ QDI		AFA	AFC	QFB
Магнитная длина L	м	0.3		0.3		0.15		0.15
R зазора магнита	мм	15	15	20	20	18	19	15
G _{ном}	Тл/м	43.975	-44.587	43.975	-44.587	51.521	49.875	48.664
G _{max}	Тл/м	70	70	55	55	55	55	70
Поворотное поле B	Тл	0	0	0	0	-0.257	-0.349	0
ΔB/B (R=10 mm)	%	±0.1	±0.1	±0.1	±0.1	±0.5	±0.5	±0.1
Количество общее/изготовлено/изменено	шт	30/30/0	30/20/0	2/0/0	2/0/0	128/2/0	32/1/0	32/20/0

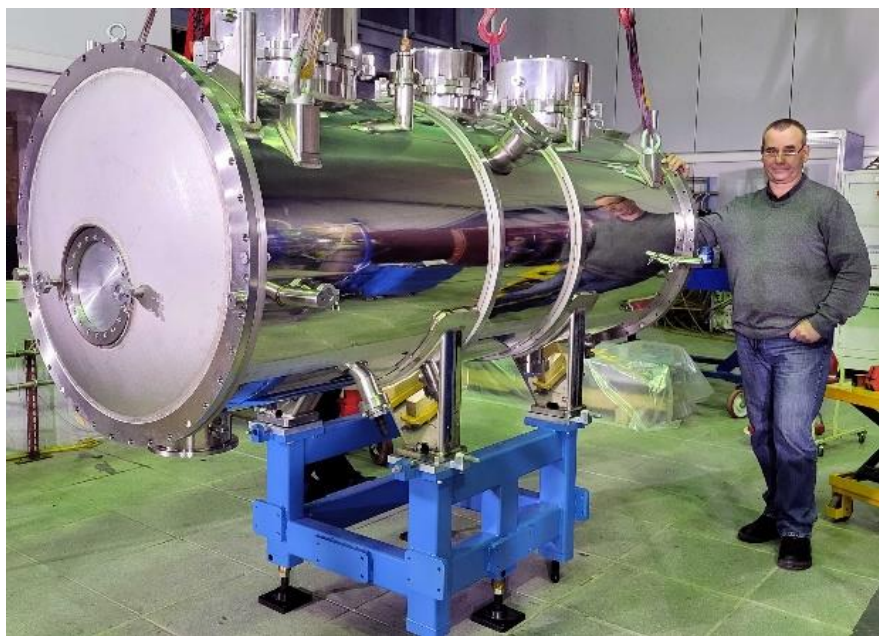
Магнитные элементы накопительного кольца СКИФ

Секступоли		SFA	SDA, SDB, SDC, SDD, SDE	SFB, SFC
Магнитная длина L	м	0.15	0.25	0.3
R зазора магнита	мм	15	15	15
R вак. камеры внутренний	мм	13.5	13.5	13.5
S _{nom}	Тл/м ²	2314.69	-2381.03	2314.69
S _{max}	Тл/м ²	2800	2800	2800
ΔB/B (R=10 mm)	%	±0.3	±0.3	±0.3
Количество общее/изготовлено/и змерено	шт	32/32/28	160/160/78	64/64/37
Параметры коррекции				
B _{xy}	Тл	0.01	0.01	0.01
G	Тл/м	1	1	1
G _{skew}	Тл/м	1	1	1

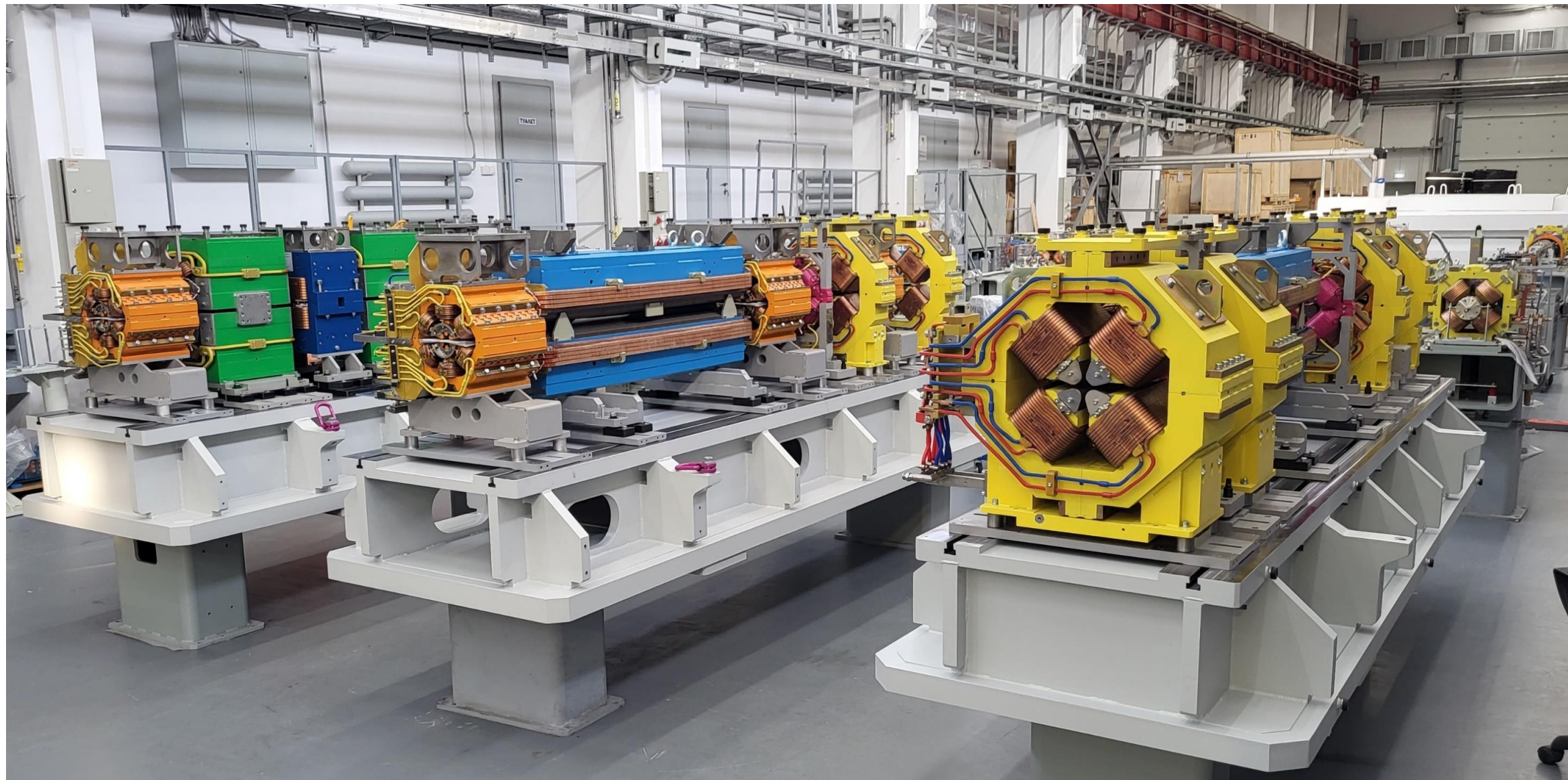
Медленный корректор		СМА
Магнитная длина L	м	0.212/0,149
R зазора магнита	мм	40
R вак. камеры внутренний	мм	13.5
B _x , B _y	Тл	0.011
G _{skew}	Тл/м	0.672
ΔB/B (R=10 mm)	%	±0.535
Количество общее/изготовлено/из мерено	шт	32/32/32

“Быстрый” корректор		СВА, СВВ, СВС
Магнитная длина L	м	0.109
R зазора магнита	мм	39
R вак. камеры внутренний	мм	13.5
Рабочая частота	кГц	1
B _x , B _y	Тл	1×10 ⁻³
ΔB/B (R=10 mm)	%	±0.15
Количество общее/изготовлено/измерено	шт	48/40/0

Оборудование накопительного кольца



Оборудование накопительного кольца



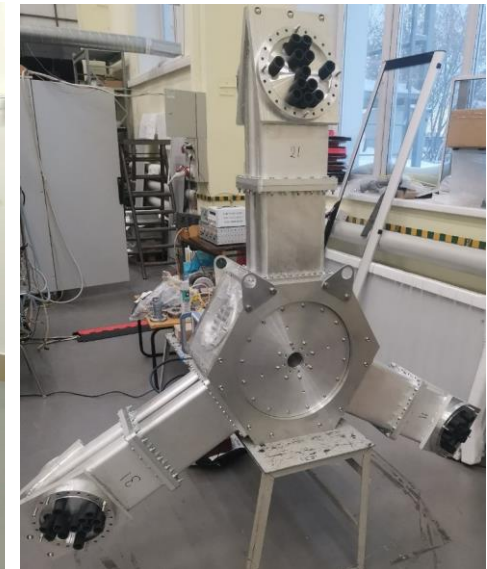
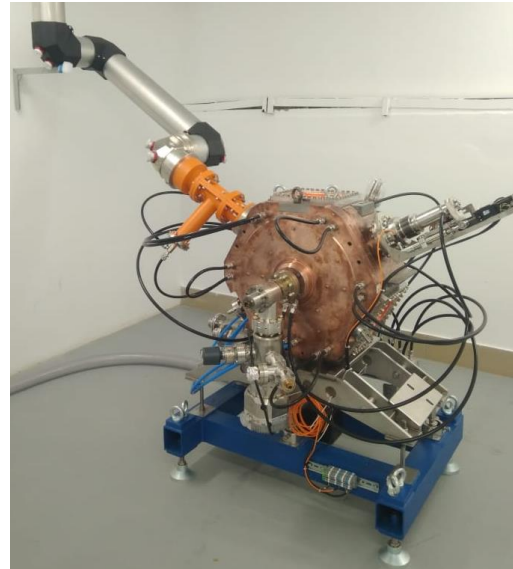
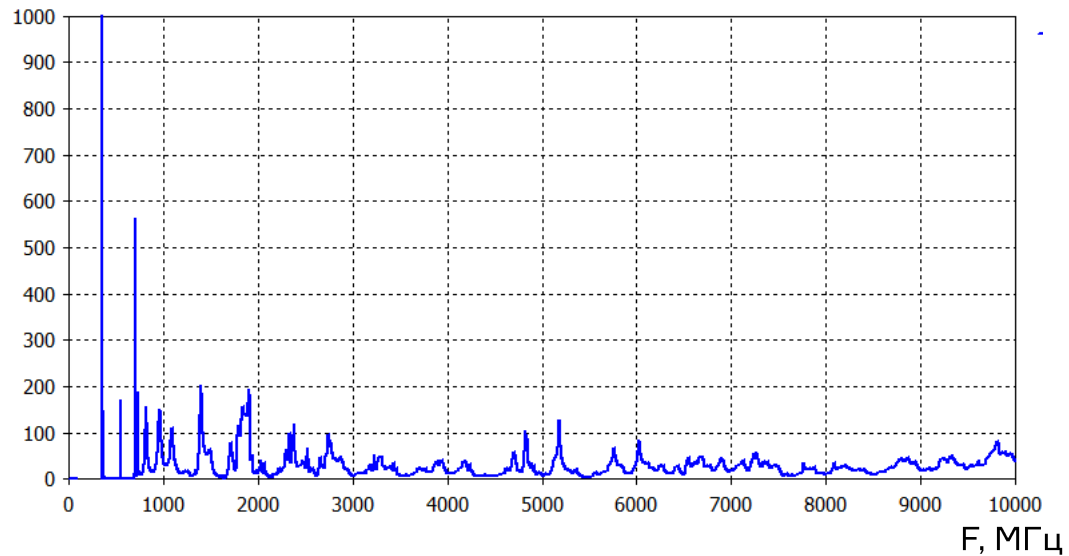
Резонаторы

	Booster	Main Ring	
f_{rf} , MHz	357	357	1071
V_{acctot} , MV	1	1.8	0.35
N	3	5	3
Type	NC	NC	NC
HOM damping	Yes	Yes	No



Re(Z), Ом

Спектр высших мод



На первом ускоряющем резонаторе накопителя/бустера достигнуто напряжение 500 кВ при номинале 400 кВ.

Источники излучения 1-й очереди

№	Experimental station	Type	B (Т)	λ_w (mm)	N_{per}
1-1	Microfocus (5-47 keV)	SCU	1.25	15.6	128
1-2	Structural analysis (5-40 keV)	SCU	1.25	15.6	128
1-3	Fast dynamic processes (15-100 keV)	SCW	2.7	27	72
1-4	XAFS and magnetic dichroism (2.5-35 keV)	SCU	1.6	18	109
1-5	Hard X-ray imagine (25-200 keV)	SCW	4.5	48	18
1-6	Photoelectron spectroscopy (0.01-2 keV)	EMU	0.49	212	20



Нижняя половина полюса СП ондулятора с периодом 15.6 мм

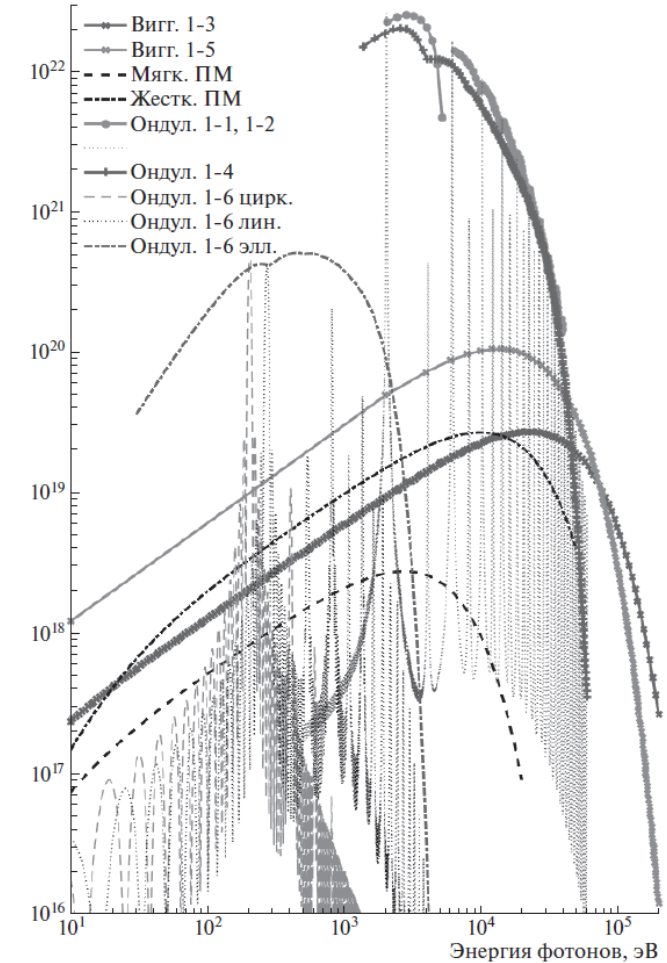


49-pole 4.2 Tesla, $\lambda=48$ mm superconducting wiggler for Diamond Light source. 2009

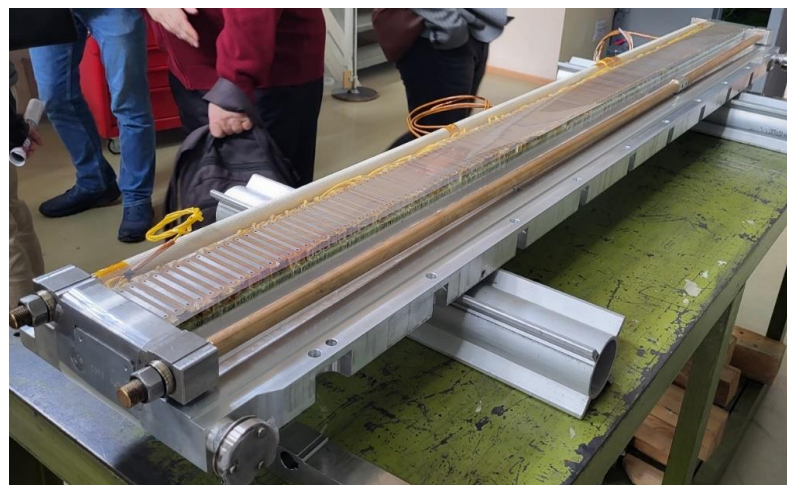
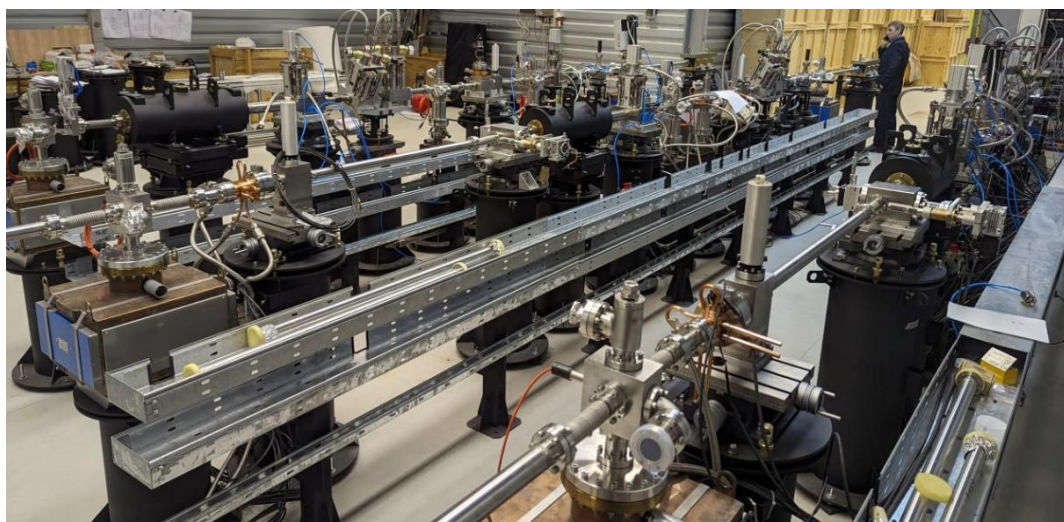
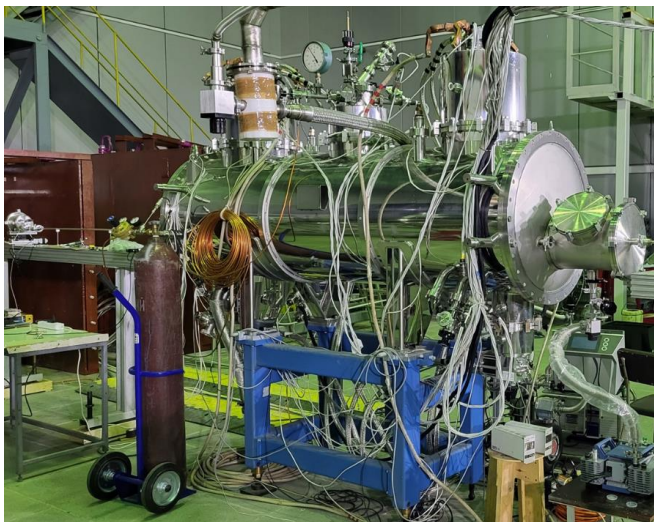


27-pole 4.2 Tesla, $\lambda=48$ mm superconducting wiggler for Canadian Light source. 2007

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



Вставные устройства, фронтэнды



Изготавливаются сверхпроводящие вигглеры и ондуляторы, а также фронт-энды для вывода СИ из накопителя.

График запуска и эксплуатации

- В настоящее время предусмотрена сдача/приемка ЦКП «СКИФ» как объекта капстроя, согласно ГрК.
- Это неправильно, т.к. запуск уникального оборудования нуждается в «уникальном» регламенте.
- Минобрнауки РФ поручил разработать такой регламент.

Поэтапный физический пуск ЦКП «СКИФ» в Кольцово:

Июль 2024 – начало сборочных работ в здании инжектора.

Ноябрь 2024 – начало работы с пучком электронов в инжекторе.

Декабрь 2024 – завершение создания источника синхротронного излучения поколения 4+. Работа с пучком в инжекционном комплексе при условии своевременной готовности соответствующих инженерных и строительных систем. Сборка накопителя в тоннеле.

Май 2025 – готовность к ПНР накопительного комплекса. Начало работ по монтажу экспериментальных станций.

Июль 2025 – первая инжекция пучка электронов в накопитель.

Август 2025 – получение первого циркулирующего пучка электронов в накопителе.

Сентябрь 2025 – начало экспериментальных работ с СИ.

Ноябрь 2025 – установка 6-ти вставных устройств первой очереди.

Декабрь 2025 – начало регулярных работ на экспериментальных станциях первой очереди.

График очень жесткий и сильно завязан на своевременное завершение строительных и инженерных работ, получения лицензий, разрешений и т.д.

Ход строительства(август 2022)



Ход строительства (июль 2024)

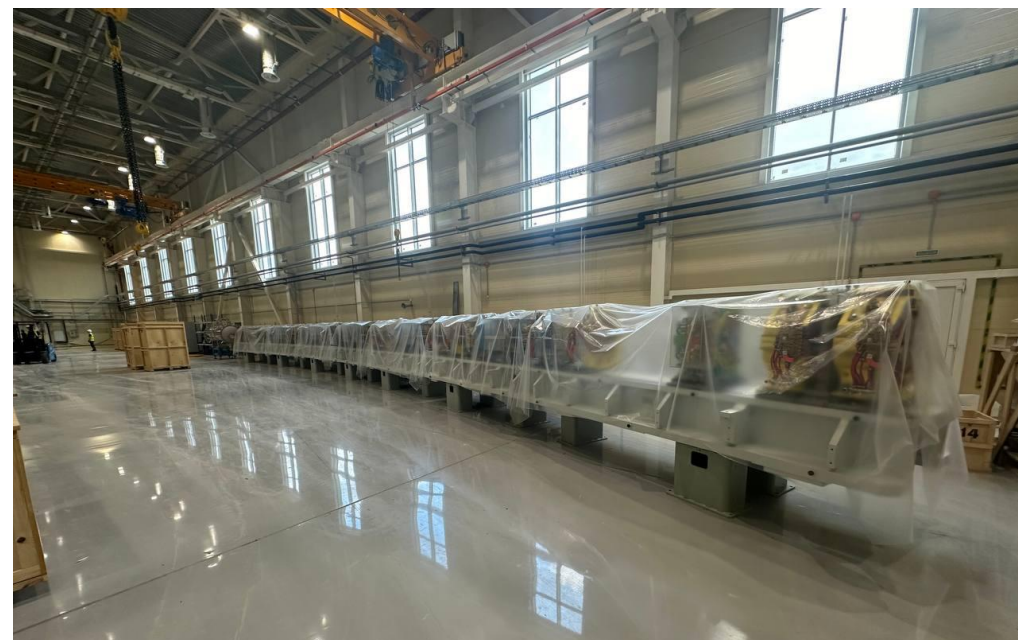
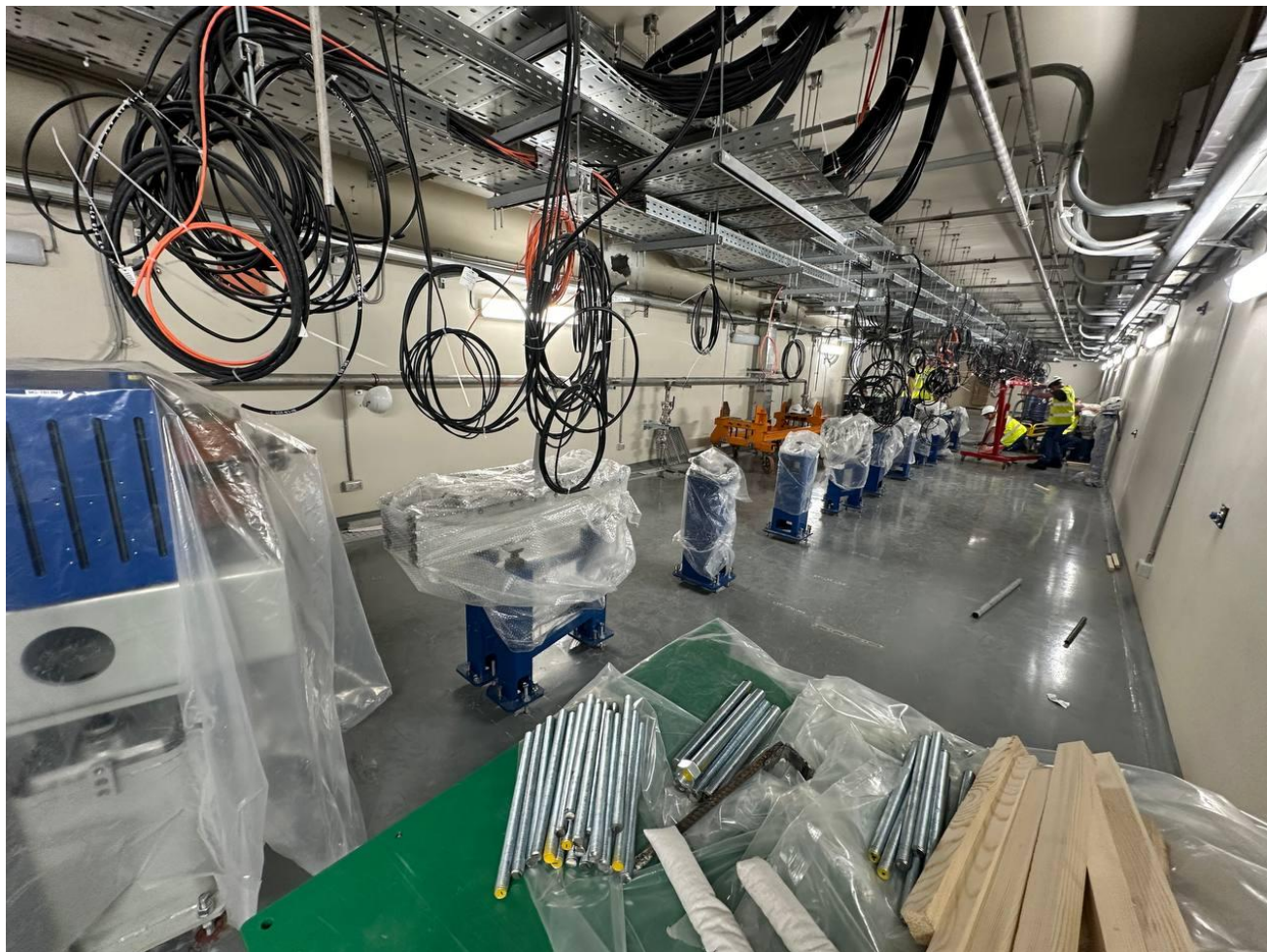


Завоз первого оборудования в Кольцово

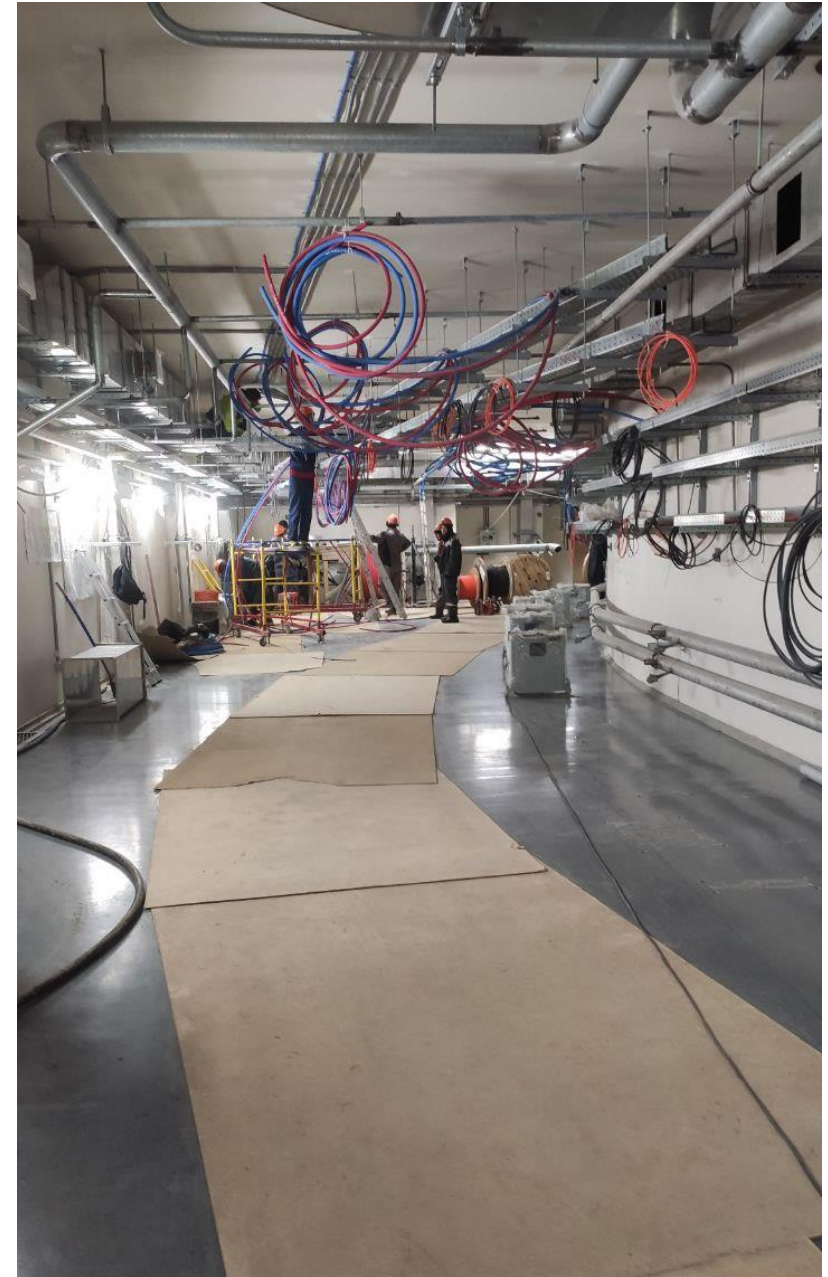
18 июня 2024 г. первое оборудование инжектора ЦКП «СКИФ» завезено в Корпус стендов и испытаний для складирования и тестовой сборки отдельных сегментов ускорительного комплекса.



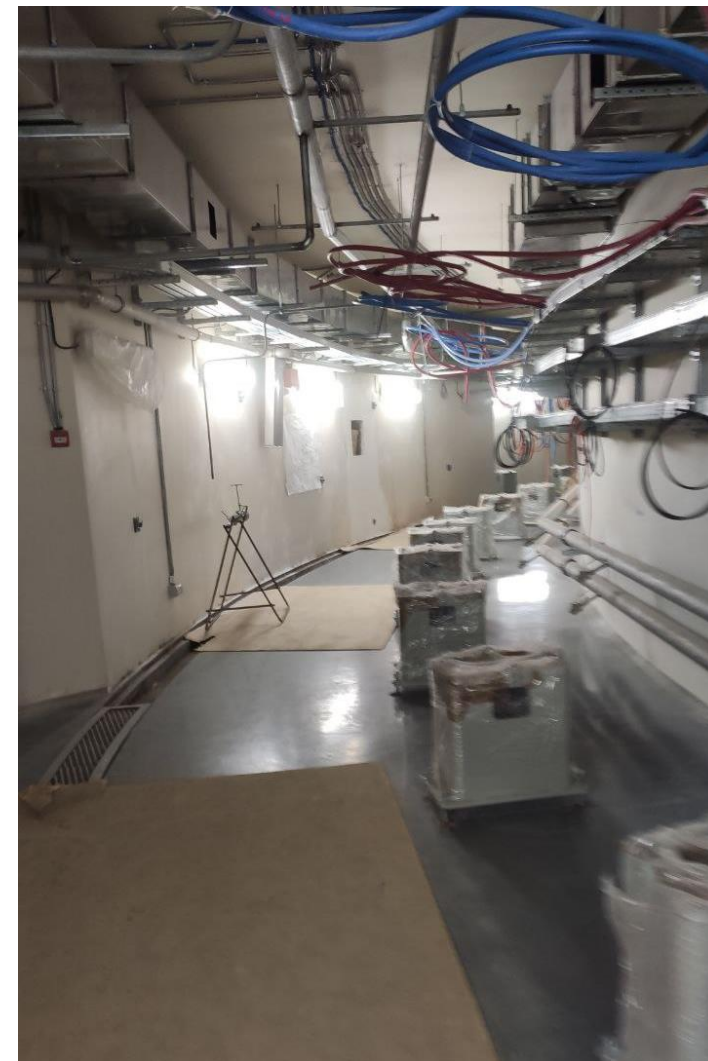
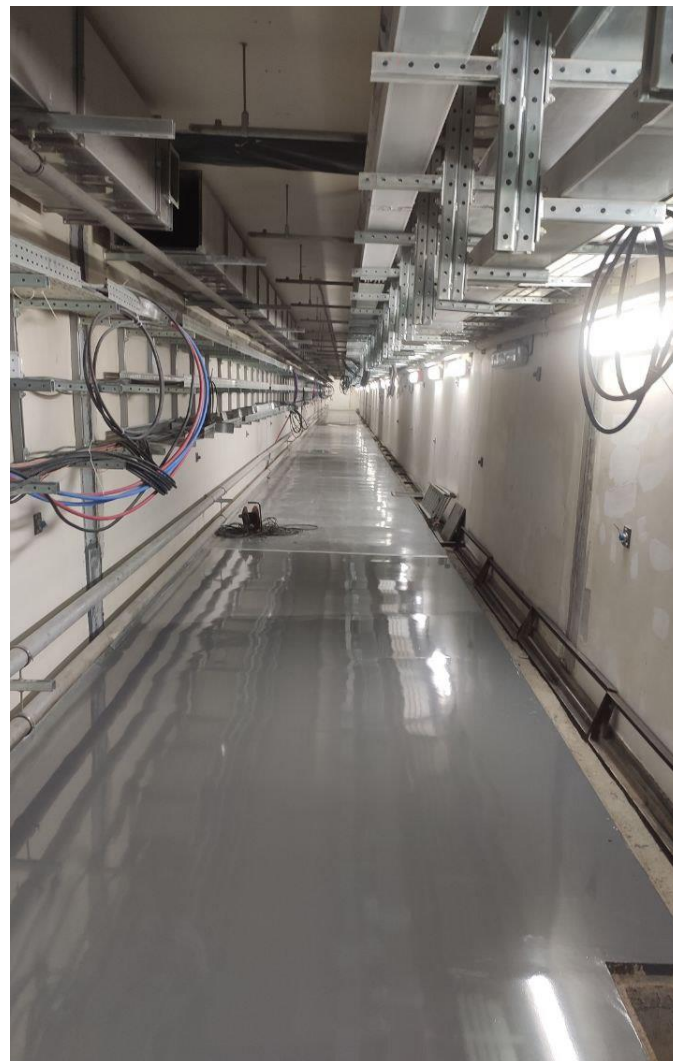
Завоз первого оборудования в Кольцово



Завоз первого оборудования в Кольцово



Завоз первого оборудования в Кольцово



Выводы

- Несмотря на сложности и санкционное давление ЦКП «СКИФ» создается.
- В первой секции линейного ускорителя пучок ускорен до 30 МэВ, получены проектные параметры.
- Инжекционный комплекс готов на 99% (для окончания требуется стыковка с элементами здания и инженерных систем).
- Активно изготавливается накопительное кольцо, включая фронт-энды и вставные устройства (готово около 60% комплектующих и оборудования). Активно изготавливаются экспериментальные станции.
- Опыт, технологии и компетенции ЦКП «СКИФ» могут быть использованы в следующих проектах источников СИ (КИСИ-2, РИФ, СИЛА).

Спасибо за внимание

G.Baranov on behalf
of the team

16.09.2024