



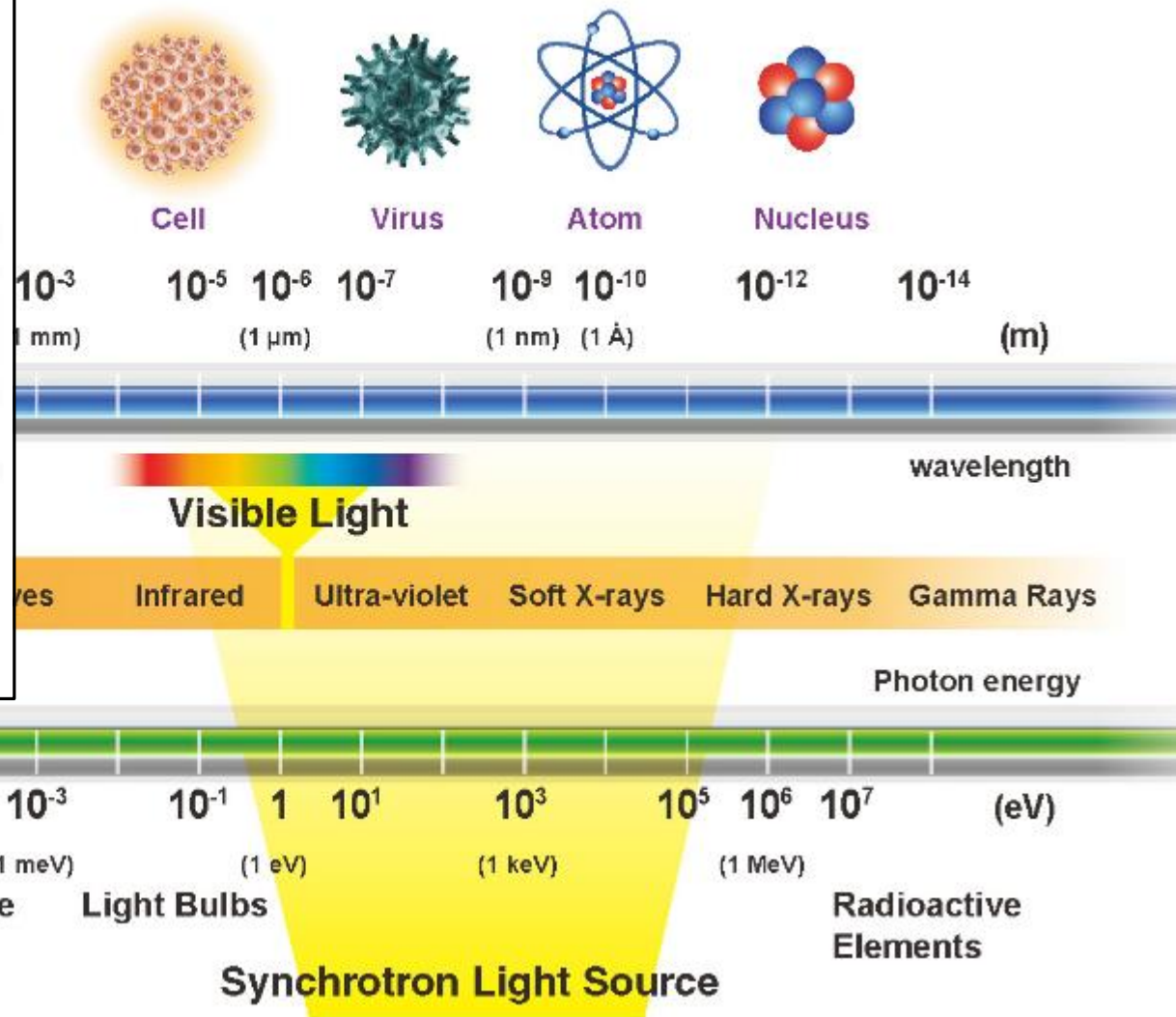
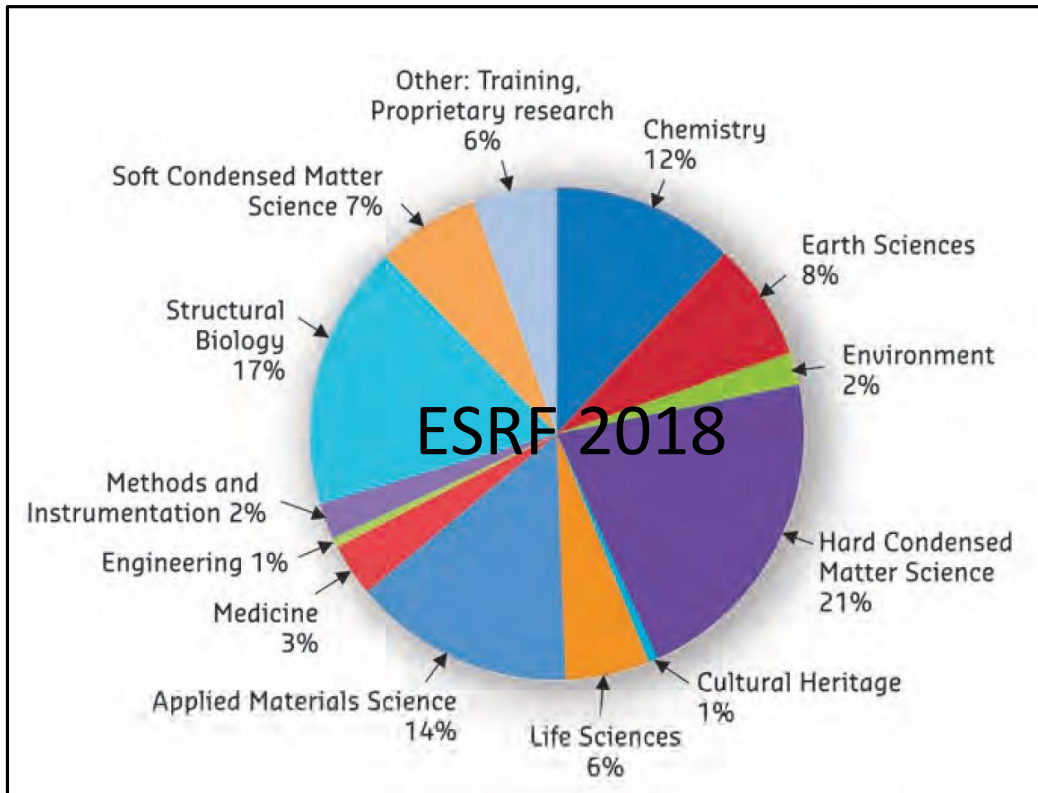
Источник СИ 4-го поколения **СКИФ** в Новосибирске

Е.Б. Левичев

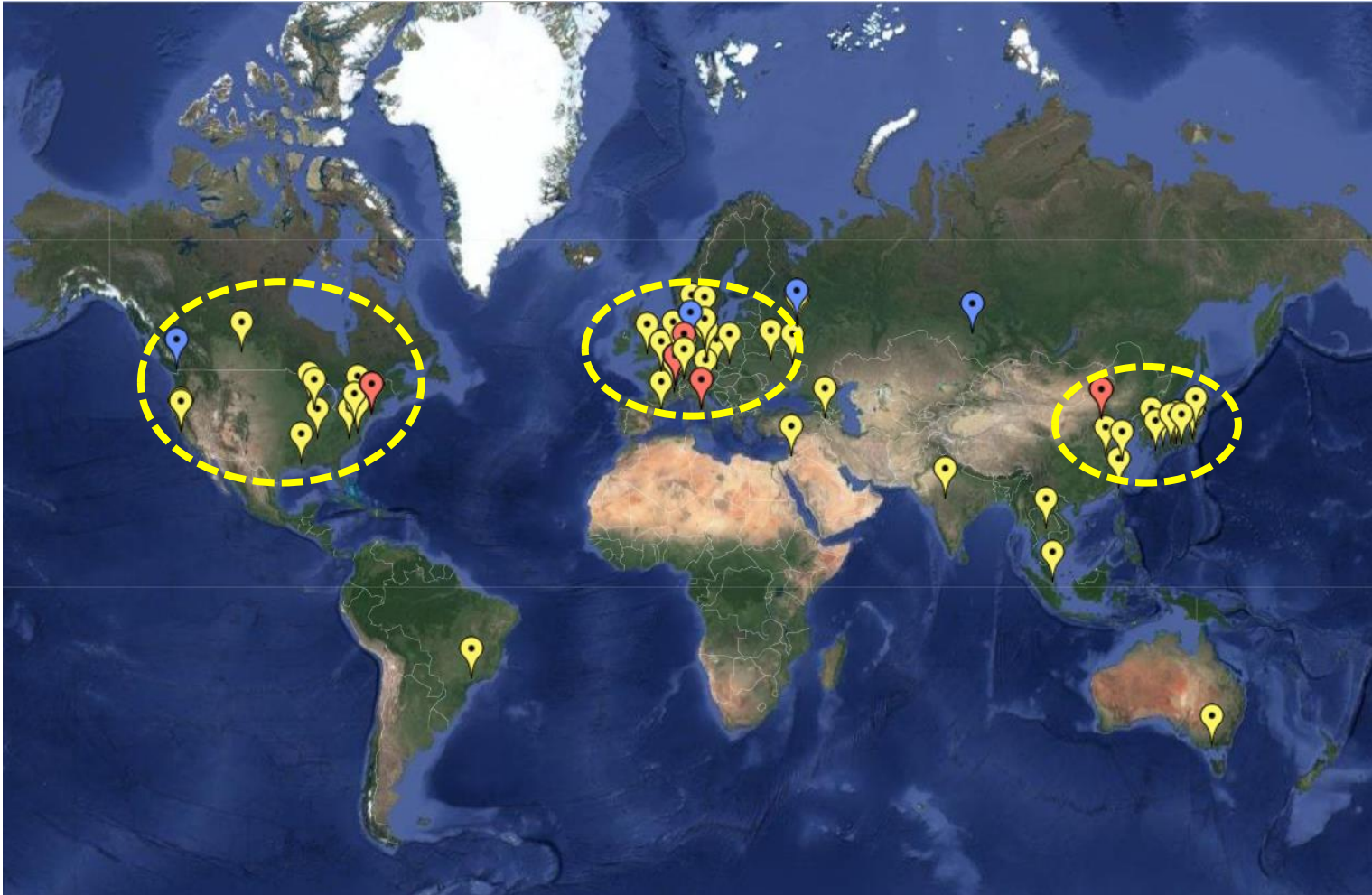
ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Сессия СЯФ ОФН, 10-12 марта 2020 г.

Синхротронное излучение



Источники СИ



Поколения источников СИ:

1. Не спец. (коллайдеры или синхротроны). $\epsilon_x \sim 300\text{-}500$ нм (ВЭПП-3, ВЭПП-4, BEPC, DAPHNE)
2. Спец. накопители, несложная оптимизация эмиттанта. $\epsilon_x \sim 20\text{-}100$ нм (Сибирь-2, CAMD, DELTA, SAGA, ANKA, ...)
3. Спец. накопители, эмиттанс оптимизирован, излучение из ондуляторов. $\epsilon_x \sim 1\text{-}10$ нм (ALS, ESRF, Diamond, Alba, ...)
4. Специализированные; эмиттанс сильно оптимизирован, много новых технологических примочек. $\epsilon_x \sim 500\text{-}100\text{...}10$ пм (NSLS-II, MAX IV, ESRF-EBD, «СКИФ»...).

Источники СИ 4-го поколения

Мах IV (Лунд, Швеция), новый, запущен в 2016 г.

$E = 3$ ГэВ, $P = 528$ м, $\varepsilon_x = 320$ пм. Бюджет строительства (2010-2016) 2.2 млрд. швед. крон (1 SEK $\sim$ 7 ₺)

Эксплуатационные расходы: 0.24 млрд. швед. крон/год (175 сотрудников)



ESRF-EBS (Франция, Гренобль), переделка, запущен в 2019 г.

$E = 6$ ГэВ, $P = 844$ м, $\varepsilon_x = 130$ пм. Годовой бюджет – 135 М€ (взносы 13 государств-участников + 8 ассоциированных членов).

Численность сотрудников – 673, бюджет модернизации 150 М€.



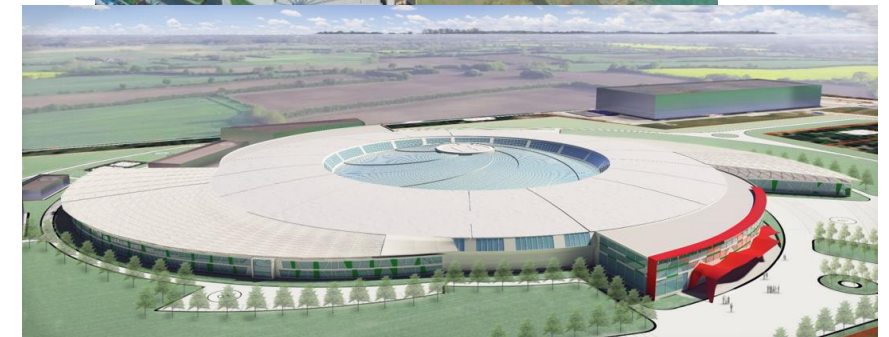
Sirius (Кампинас, Бразилия), новый, запущен в 2019 г.

$E = 3$ ГэВ, $P = 518$ м, $\varepsilon_x = 250$ пм ($\rightarrow 150$ пм with IDs). Бюджет строительства (2015-2018) 1.5 млрд. браз. реалов (1 R\$ $\sim$ 17 ₺)



СКИФ (Новосибирск, Россия), новый, пуск 30 декабря 2023 г.

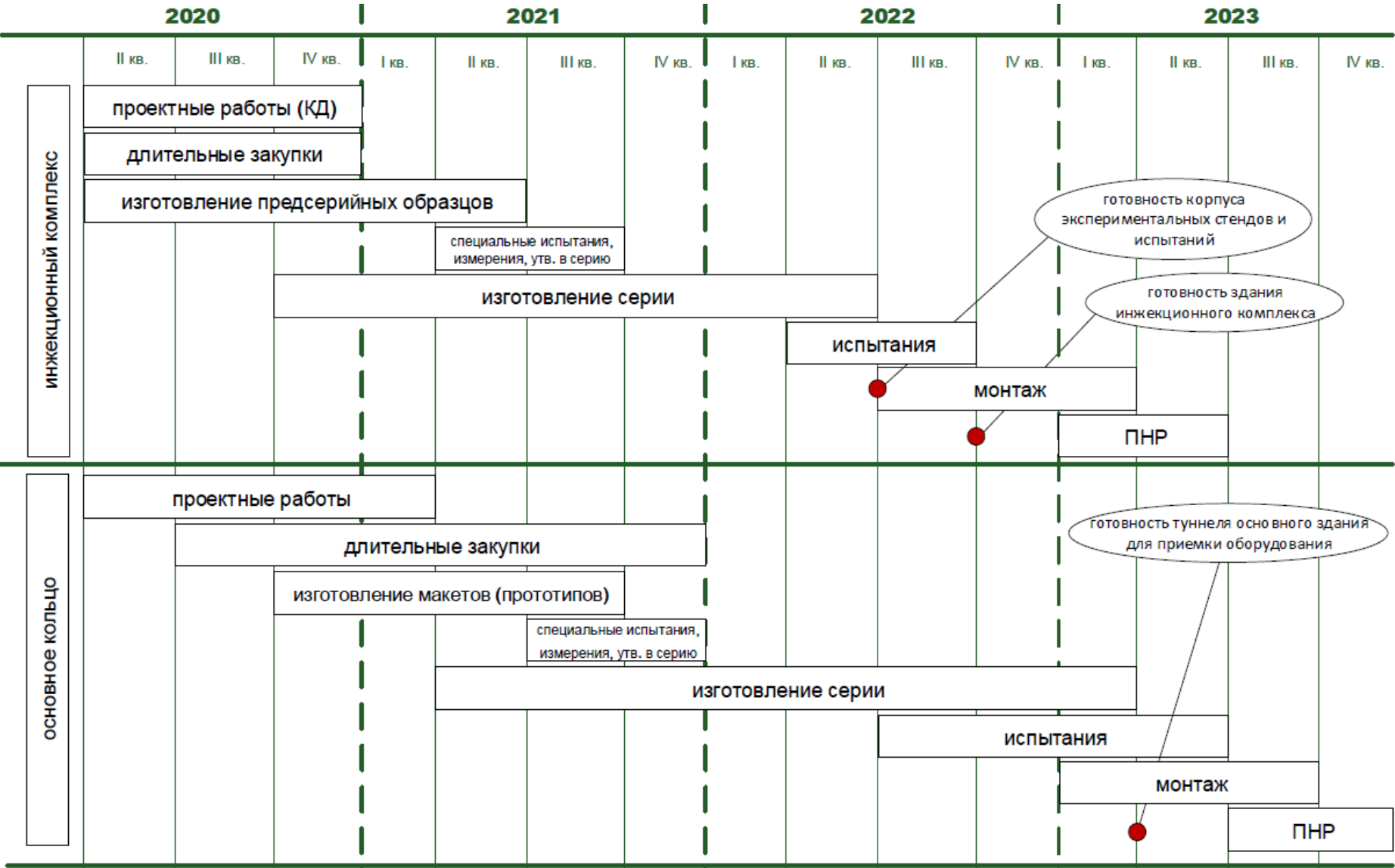
$E = 3$ ГэВ, $P = 476$ м, $\varepsilon_x = 75$ пм ($\rightarrow 50$ пм with IDs). Бюджет – 37 млрд.руб.



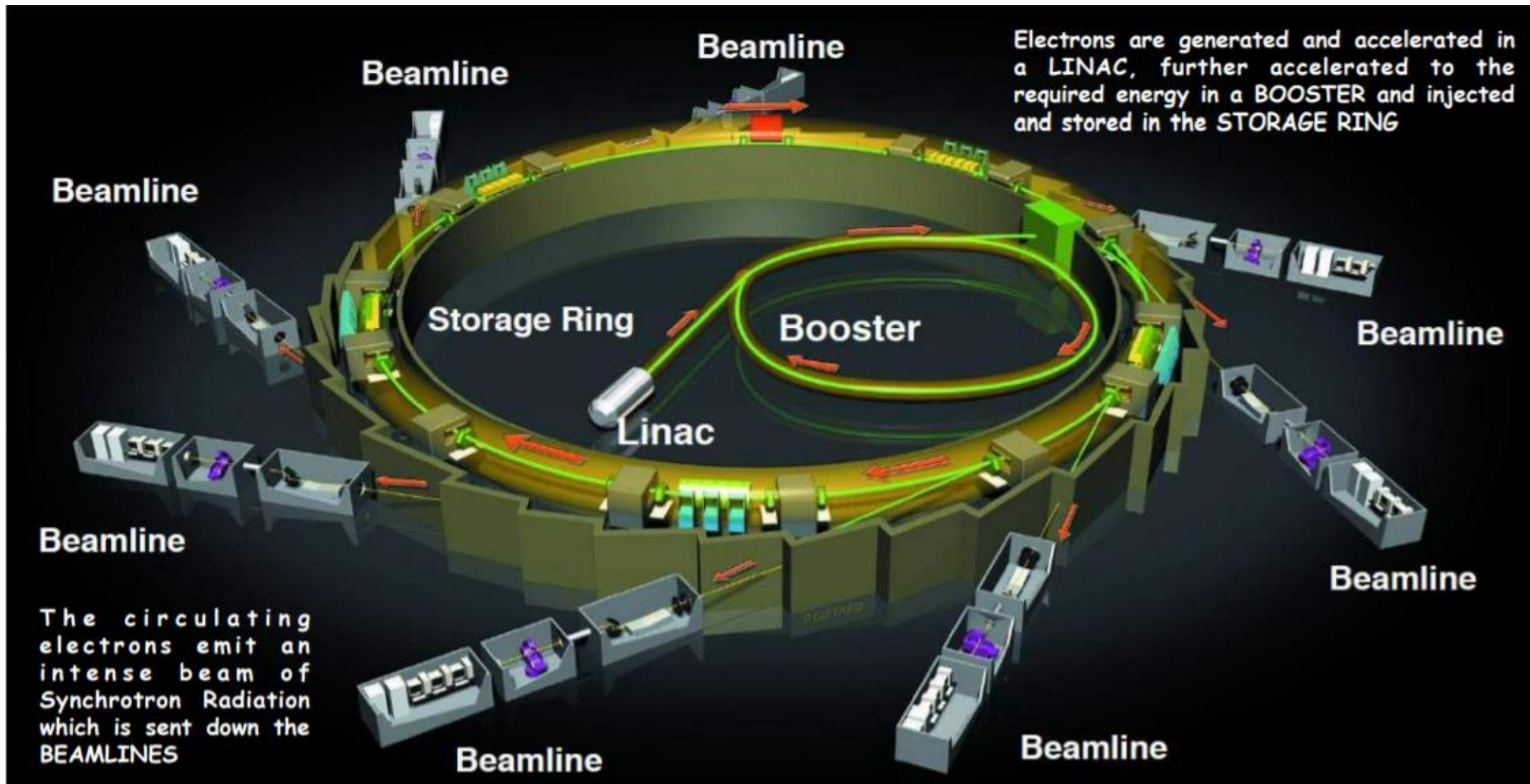
История СКИФ

Совет по науке при Президенте Российской Федерации в Новосибирске	08.02.2018
Поручение Президента РФ №656	18.04.2018
Создание Научно-координационного совета ЦКП СКИФ	11.05.2018
Передача земельного участка под СКИФ в ИК СО РАН	15.04.2019
Указ Президента РФ №356 (о ФНТП)	25.07.2019
Совет ФНТП утвердил характеристики СКИФ	17.10.2019
Постановление Правительства РФ №1777 (о ФАИП)	23.12.2019
Распоряжение Правительства РФ №511-р (о ЦПТИ)	04.03.2020
...	
...	
Создание источника СИ поколения 4+ СКИФ	30.12.2023
Запуск в эксплуатацию исследовательской инфраструктуры	30.12.2024

План-график СКИФ



Источник СИ (схематически)



Проблемы малого эмиттанса (1)

Эмиттанс ультрарелятивистского электронного пучка, определяемый равновесием между радиационным трением и квантовой раскачкой:

$$\varepsilon_x = F(v_x) \frac{c_q \gamma^2}{J_x} \phi^3$$

При фиксированных энергии и периметре уменьшение эмиттанса требует

$$(K_1 l) \propto \varepsilon_x^{-1/3}$$

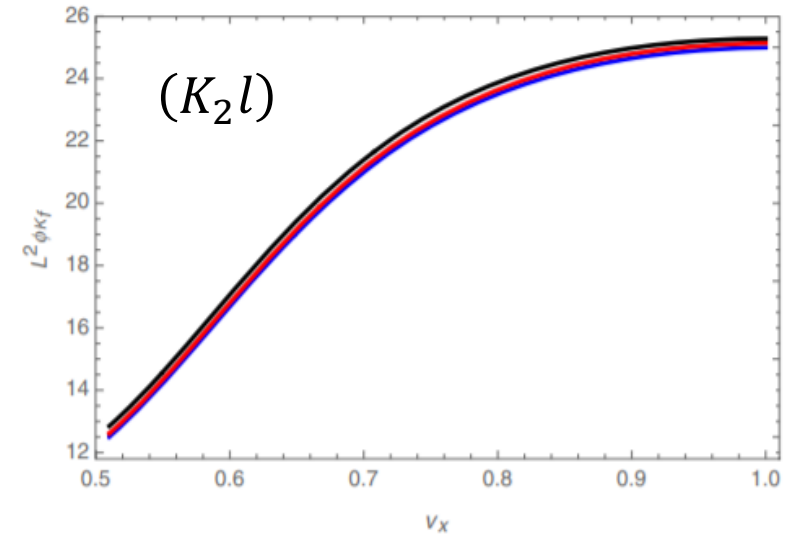
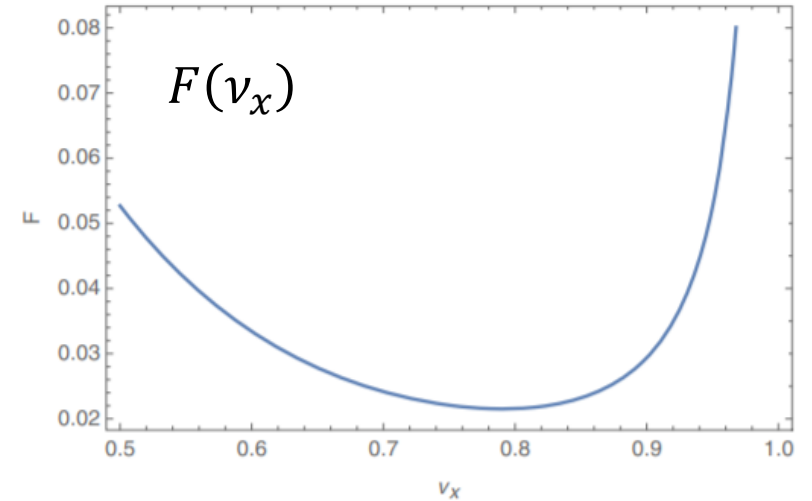
$$(K_2 l) \propto \varepsilon_x^{-1}$$

Рост сил квадрупольных и секступольных линз является основным техническим ограничением при создании ИСИ с малым эмиттансом.

Пример:

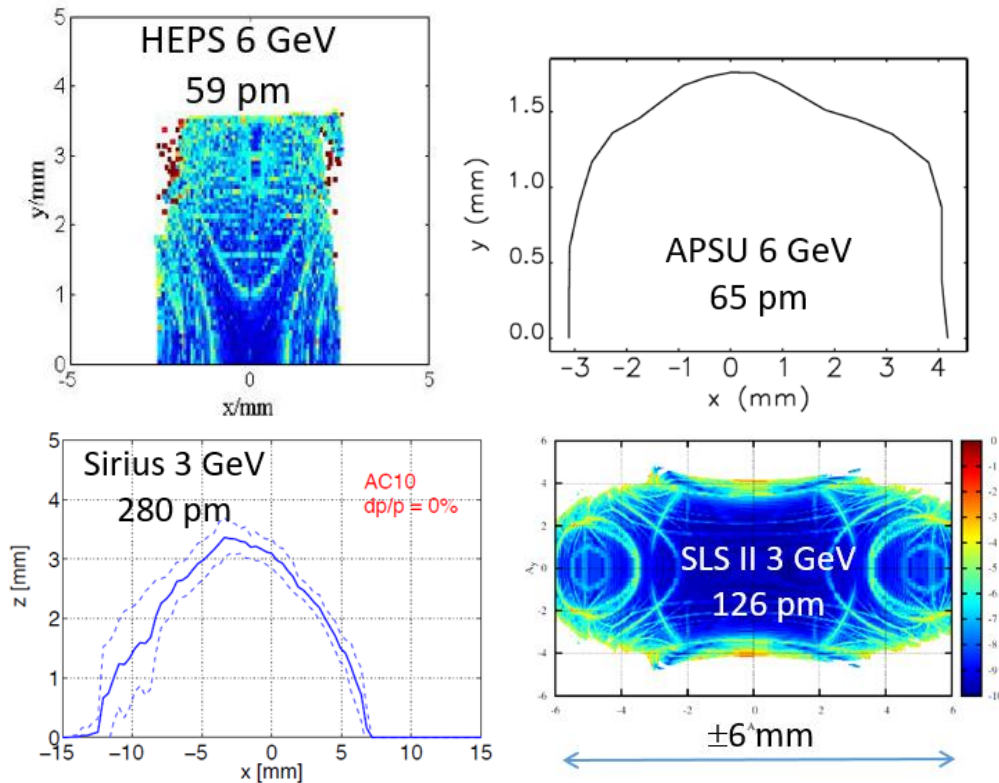
Сибирь-2 $\varepsilon_x = 90$ нм $G_{max} \approx 30$ Т/м $B'' \approx 600$ Т/м²

СКИФ $\varepsilon_x = 75$ пм $G_{max} \approx 70$ Т/м $B'' \approx 2400$ Т/м²



Проблемы малого эмиттанса (2)

- Сложные квадрупольные и секступольные линзы с большими градиентами. Решается путем уменьшения апертуры до 20-25 мм.
- Сильно нелинейное движение. Проблема с областью устойчивости движения частиц (динамическая апертура). Решается сложной оптимизацией, постановкой дополнительных мультиполей (секступолей, октуполей и т.д.).
- Малые размеры пучка при большой интенсивности приводят к сильному внутрисгустковому рассеянию: растет эмиттанс, падает время жизни пучка (эффект Тушека). Решается (а) удлинением сгустка, (б) введением дополнительного радиационного трения (сильнополевые вигглеры).

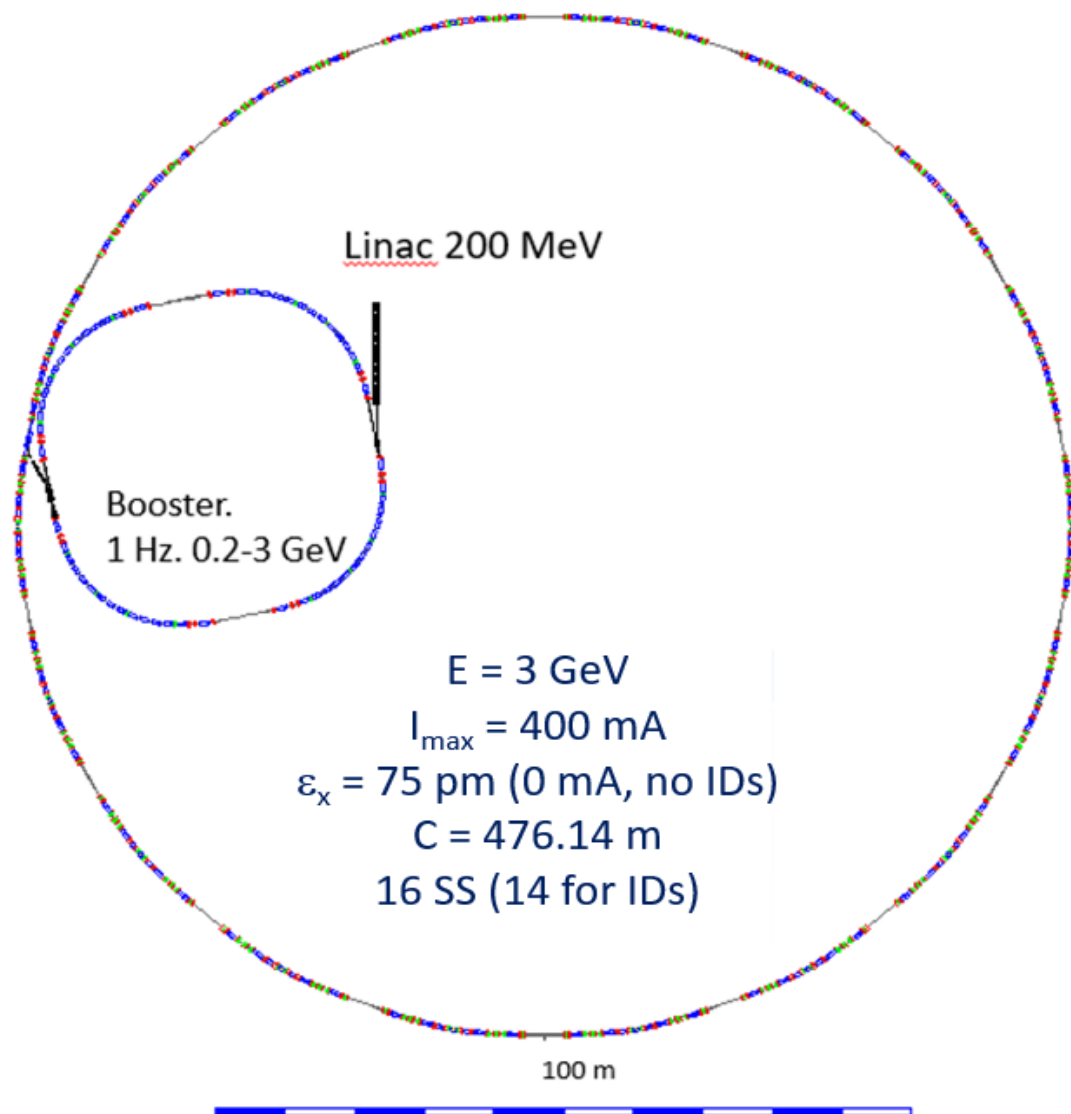


Динамическая апертура источников СИ 4-го поколения

СКИФ: техническое задание

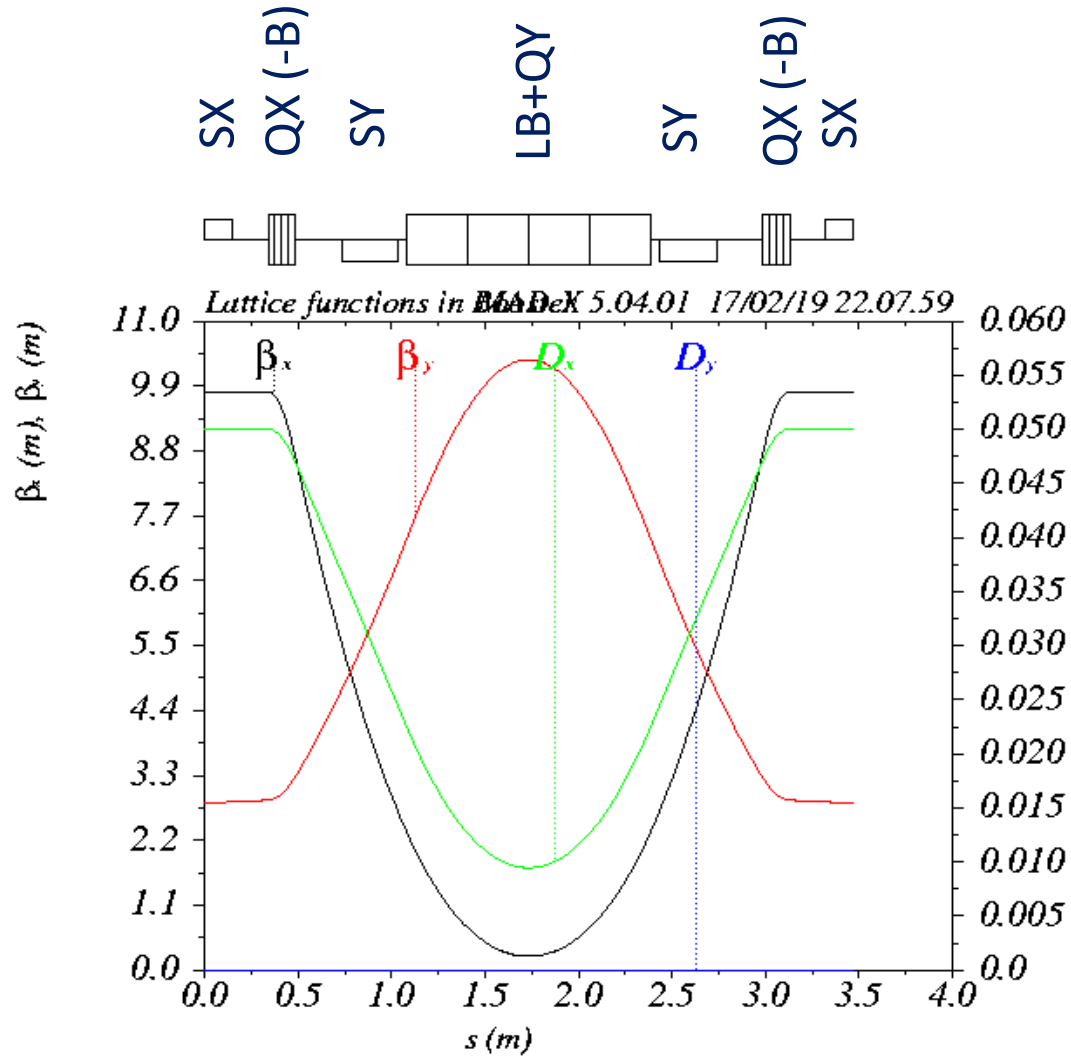
- Энергия 3 ГэВ.
- Периметр ≤ 500 м.
- Горизонтальный эмиттанс ≤ 100 пм (нулевой ток и связь).
- Достаточное число каналов вывода СИ из (1) вигглеров и ондуляторов, (2) магнитов с сильным полем (жесткий рентген), (3) магнитов со слабым полем.
- Простота и дешевизна конструкции (короткий срок реализации!).
- Инжекция на энергии эксперимента из синхротрона-бустера а la «бустер NSLS II».
- Поперечная апертура, достаточная для простой, надежной инжекции.
- Продольная апертура, достаточная для обеспечения времени жизни в условиях сильного внутрисгусткового рассеяния.
- Гибкость оптики. Возможность компенсации влияния сильнополевых вигглеров для купирования возможного ухудшения характеристик источника.

Конфигурация и параметры

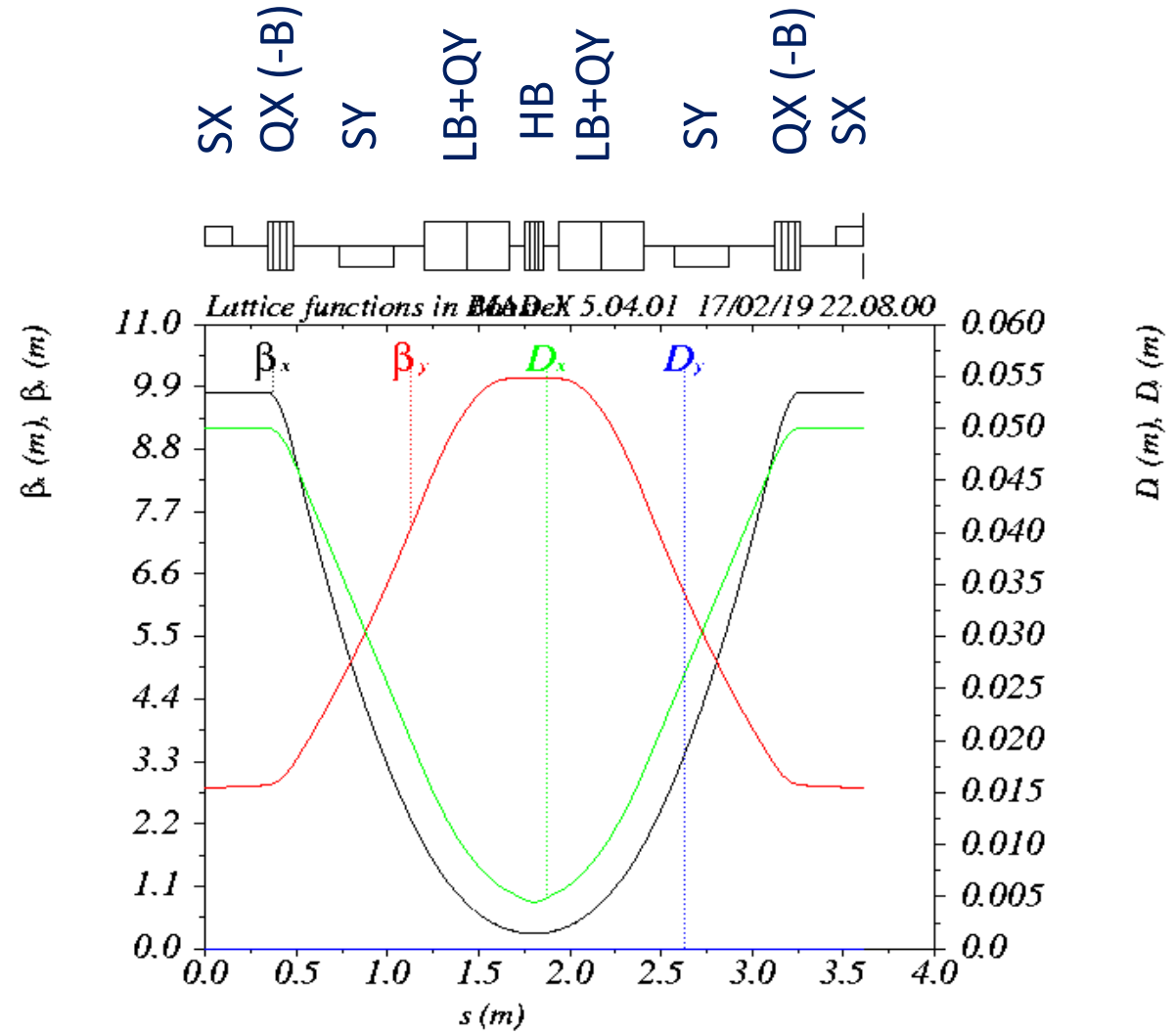


Энергия пучка, ГэВ	3
Симметрия	16
Периметр, м	476.14
Период обращения, μs	1.59
Горизонтальный эмиттанс, пм	72
Энергетический разброс	$1 \cdot 10^{-3}$
Потери на оборот, кэВ	535
Бетатронные частоты, (x/y)	50.88 / 17.76
Коэффициент уплотнения орбит	$7.6 \cdot 10^{-5}$
Натуральный хроматизм, (x/y)	-162/-58
Гармоника ВЧ-резонатора	567
Частота ВЧ, МГц	357
Напряжение ВЧ, МВ	0.77
Энергетический акцептанс	2.6 %
Синхротронная частота	$1.13 \cdot 10^{-3}$
Длина сгустка, мм	5.5
Радационные числа, (x/e)	1.91/1.09
Время затухания, (x/e), <u>мс</u>	9/16

Базовая ячейка магнитной структуры (FODO/TME)

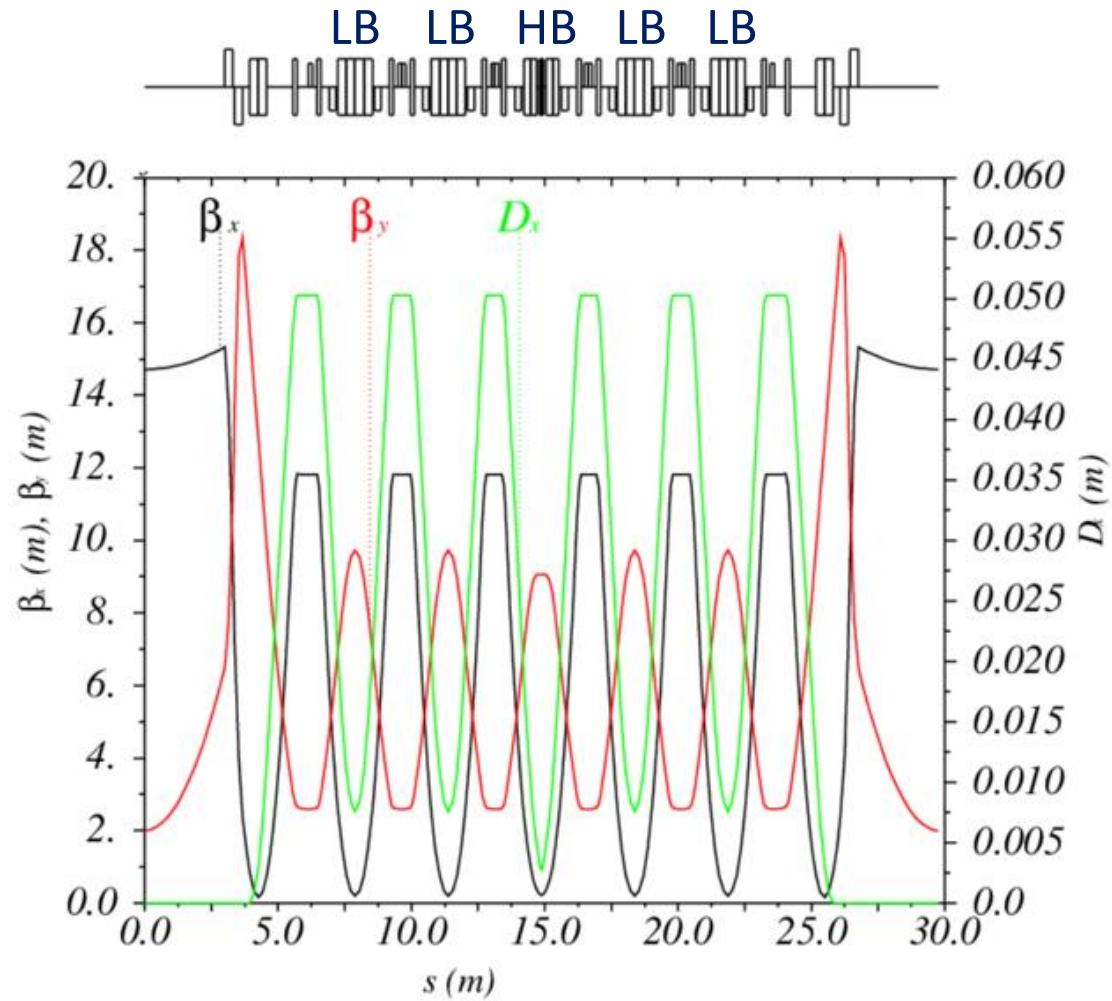


Магнит со слабым полем (мягкий рентген)

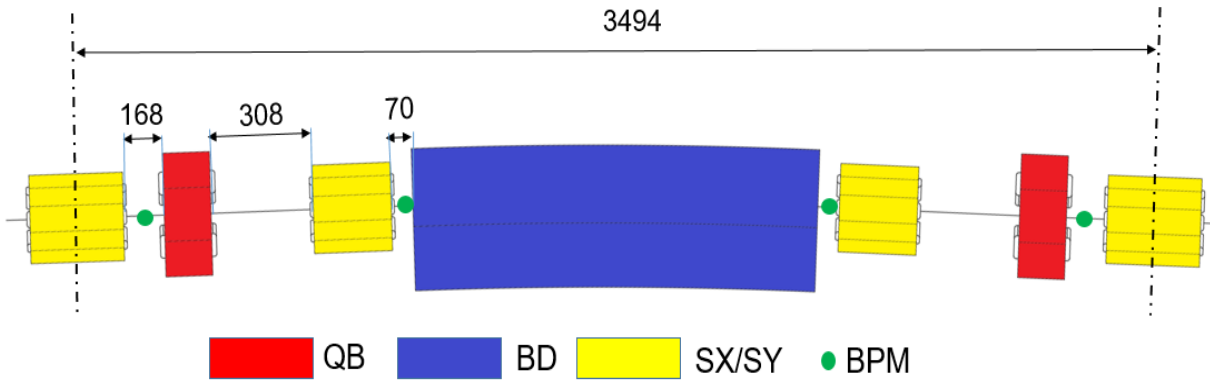


Магнит сильным полем (жесткий рентген)

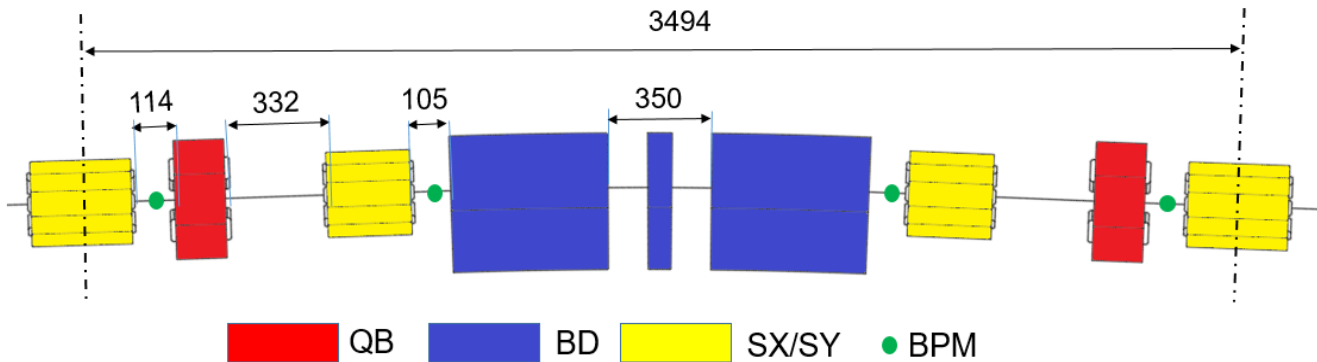
Структура суперпериода



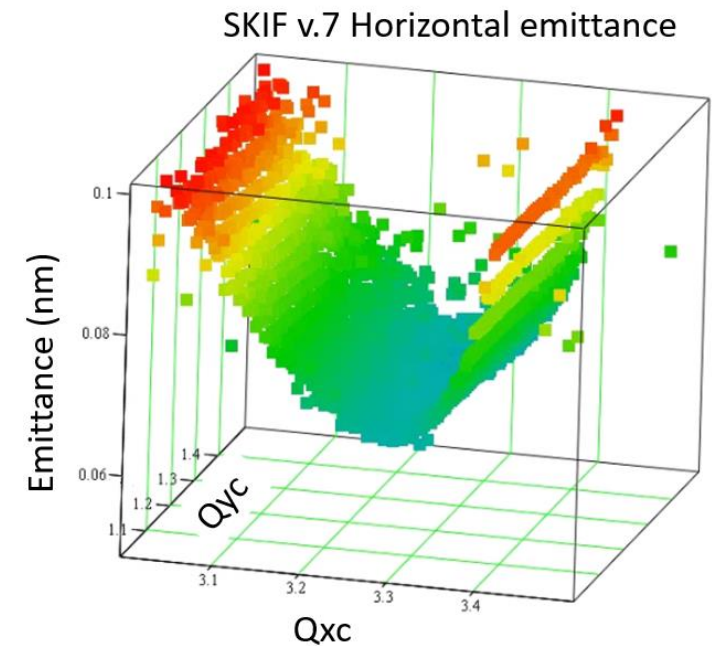
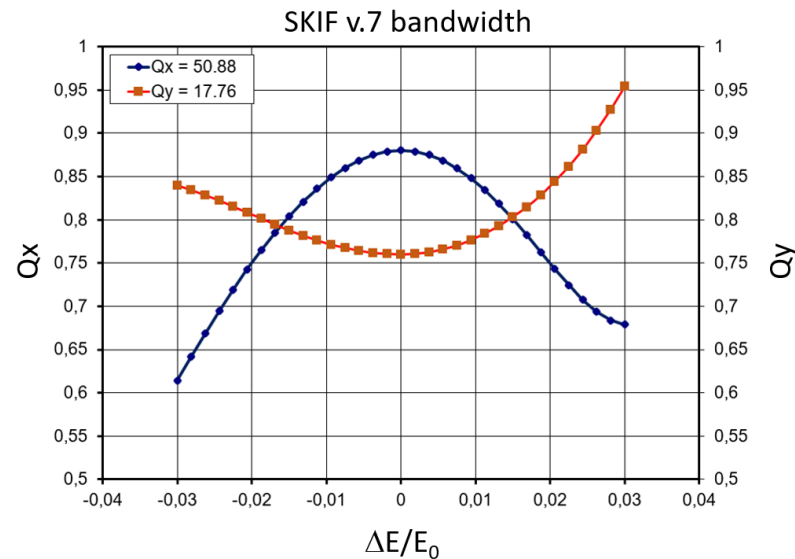
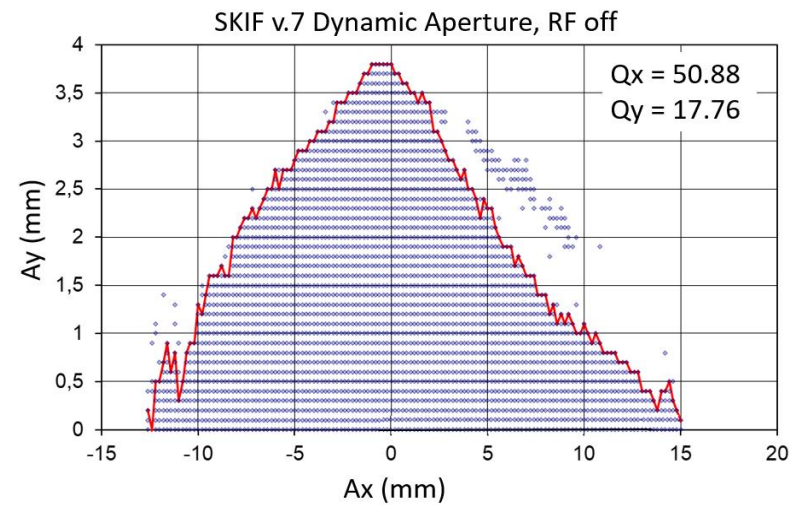
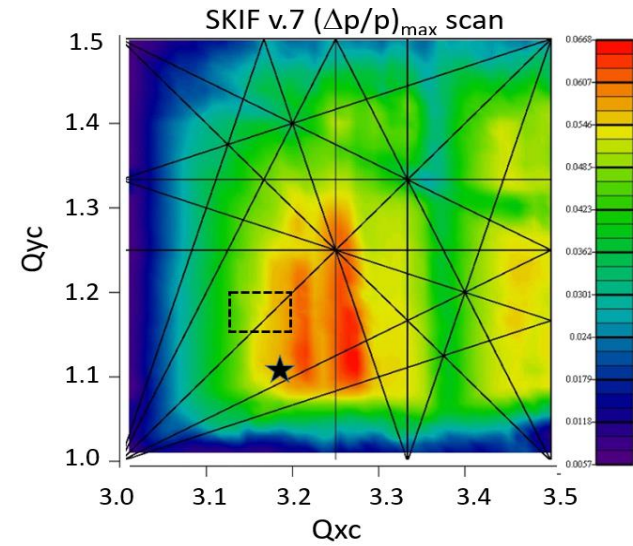
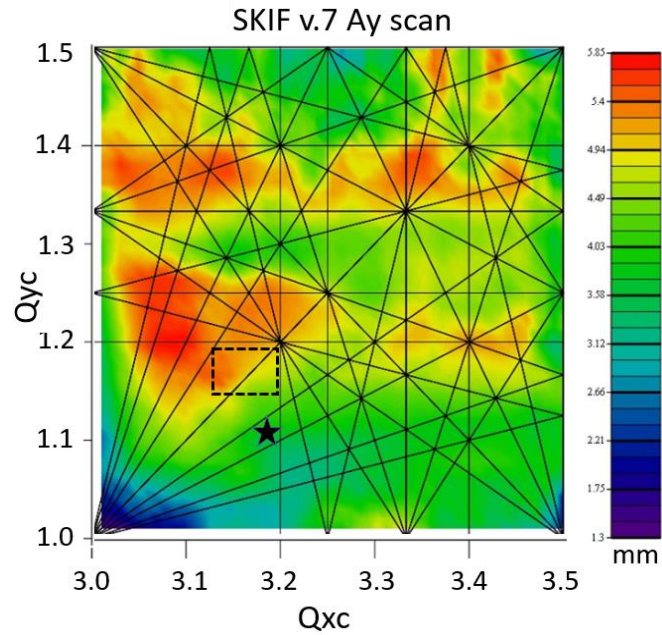
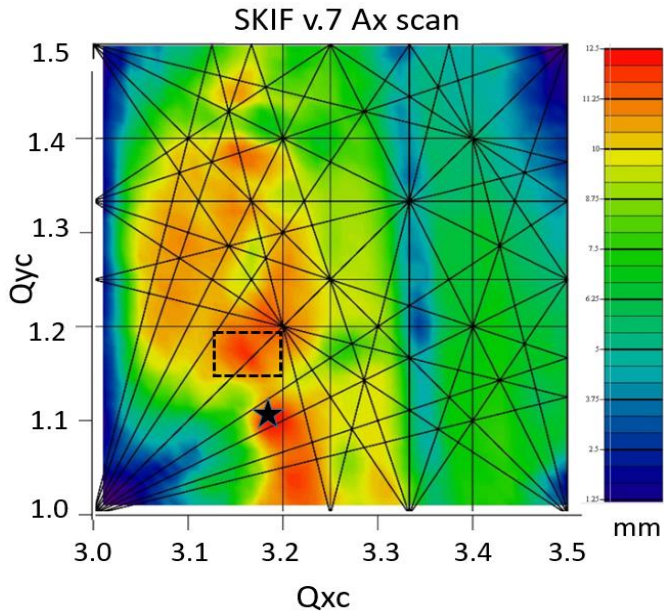
Ячейка LB



Ячейка HB



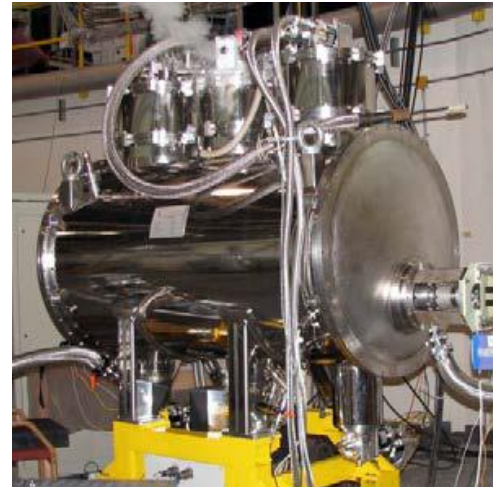
Оптимизация динамической апертуры



Вигглеры и ондуляторы

СКИФ предполагает широкое использование сверхпроводящих «вставных устройств» (insertion devices) – вигглеров и ондуляторов – для увеличения яркости и интенсивности жесткого рентгеновского излучения.

№	Станция, энергетический диапазон	Устр.	B (Т)	λ_w (мм)	N_{per}	P_{SR} (кВт)
1-1	«Микрофокус» (5-47 кэВ)	SCU	1.2	15.6	128	7.2
1-2	Структурная диагностика (5-40 кэВ)	SCU	1.2	15.6	128	7.2
1-3	Быстропротекающие процессы (15-100 кэВ)	SCW	4	33.7	60	75
1-4	XAFS и магнитный дихроизм (2.5-35 кэВ)	SCU	1.2	15.6	128	7.2
1-5	Диагностика высокой энергии (25-200 кэВ)	SCW	4	33.7	60	75
1-6	Электронная структура (0.01-2 кэВ)	EMU	0.5	100/200	20/10	1.8



Влияние вигглеров на параметры

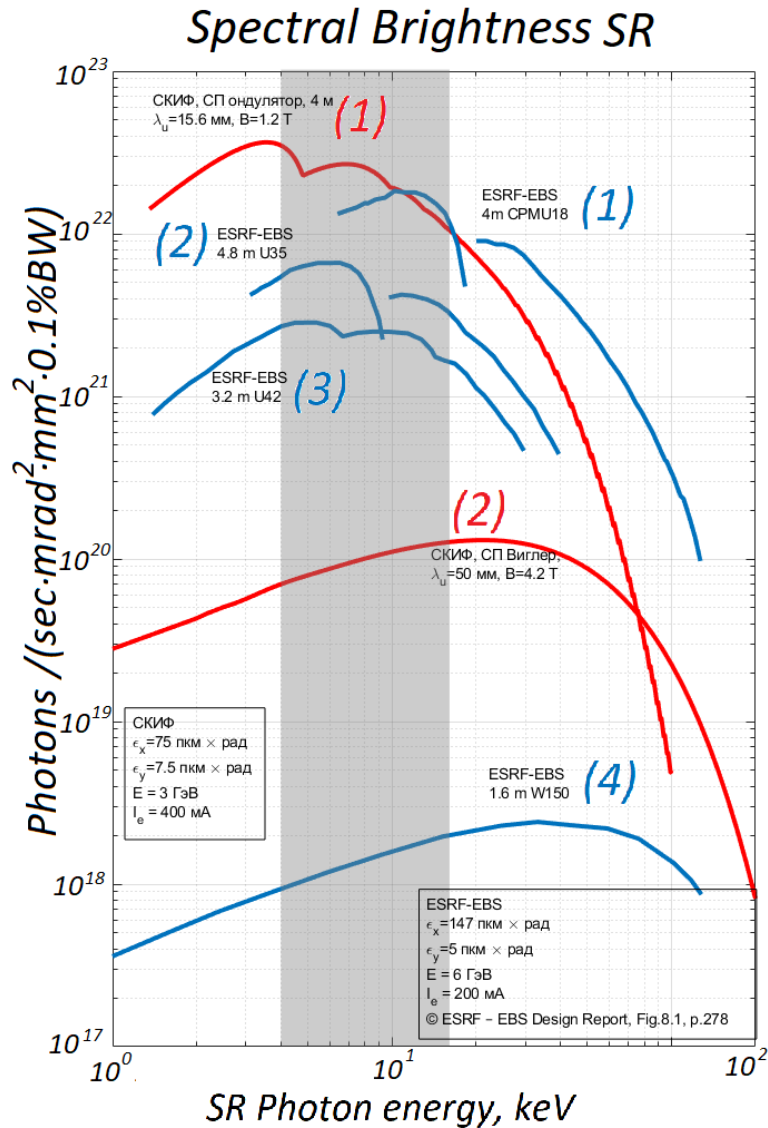
Параметр		0W	1W	2W	3W
Энергия	ГэВ	3			
Периметр	м	476.14			
Время оборота	μс	1.59			
Частота обращения, f_0	МГц	0.62963			
Коэф.уплотнения орбит, α		$0.76 \cdot 10^{-4}$			
Эмиттанс	пм	72	61	54	48
Энергетический разброс		$1.01 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-3}$
Потери энергии/оборот	КэВ	535	720	905	1100
Номер гармоники		567			
Частота ВЧ		357 МГц			
Напряжение ВЧ	МВ	0.77	1.15	1.35	1.5
Длина сгустка, σ_s	см	0.55	0.5	0.5	0.5
ВЧ акцептанс	%	2.1	2.1	2.1	2.1
Декременты затухания (x/s)		1.91/1.09	1.67/1.33	1.54/1.46	1.44/1.56
Время затухания(x/y/s)	мс	9.3/18/ 16.5	8/13/10	6.8/10/ 7.2	6/9/6

Влияние вигглеров и IBS на параметры

Два вигглера и четыре ондулятора. Ток 400 мА, 510 сгустков, энергетический акцептанс $\pm 2.5\%$.

	10%		100%	
	RF1	RF1+3	RF1	RF1+3
ϵ_{x0} , pm	51.7			
$\epsilon_{xcoupled}$, pm	47		25.8	
ϵ_{xIBS} , pm	84.9	65.1	43	33.6
ϵ_{yIBS} , pm	8.49	6.51	43	33.6
$\sigma_E/E \times 10^4$ (0/IBS)	12.77/13.73	12.77/13.25	12.77/13.26	12.77/13
σ_I (mm)	5.56/5.97	16.66/17.29	5.56/5.77	16.66/16.97
τ_{TIBS} (hours)	1.46	3.8	3	8.64
$N/\epsilon_{xIBS}\epsilon_{yIBS} \times 10^{-30}$ (m ⁻² /bunch)	10.8	18.3	4.21	6.89

Спектры



Ring parameters

ESRF-EBS (ESRF-EBS Design Report, Fig.8.1, p.278):

E = 6 GeV, I_{beam} = 200 mA

$\epsilon_x = 147$ пкм·рад $\epsilon_y = 5$ пкм·рад

SKIF:

E = 3 GeV, I_{beam} = 400 mA

$\epsilon_x = 75$ пкм·рад $\epsilon_y = 7.5$ пкм·рад

Source parameters

(1) ESRF-EBS, 4 m CPMU18

(2) ESRF-EBS, 4.8 m U35

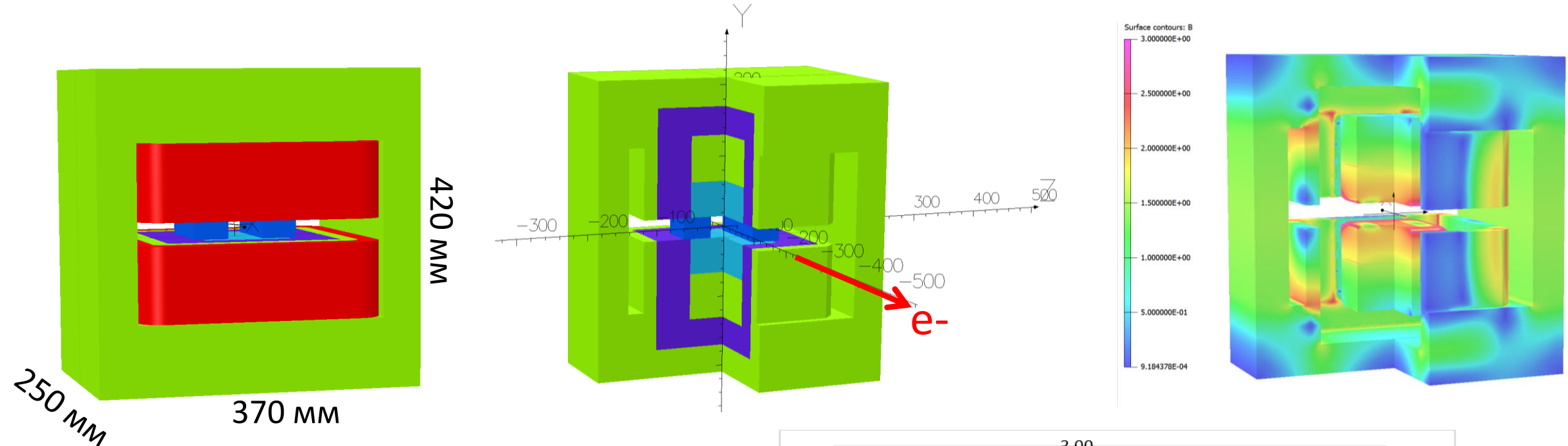
(3) ESRF-EBS, 3.2 m U42

(4) ESRF-EBS, 1.6 m W150

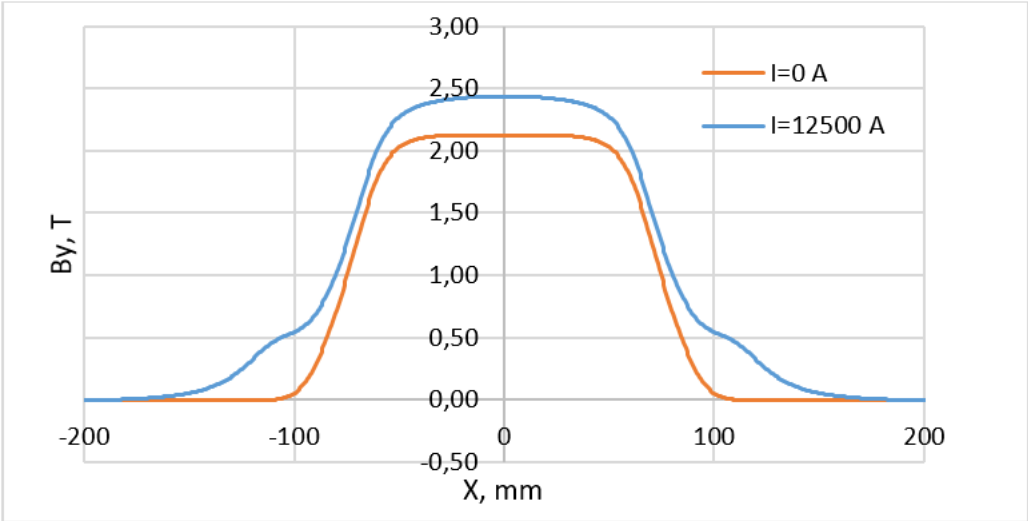
(1) SKIF, 4 m SC Undulator, $\lambda_u = 15.6$ мм, B= 1.2 Т

(2) SKIF, 2 m SC Wiggler, $\lambda_u = 50$ мм, B= 4.2 Т

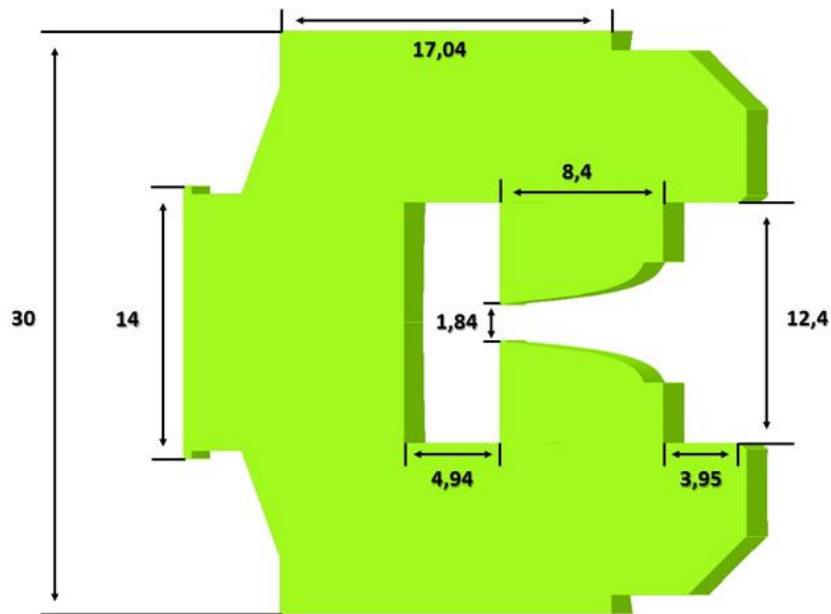
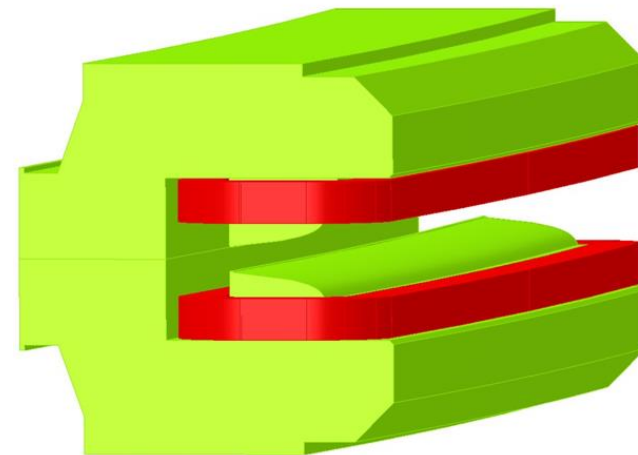
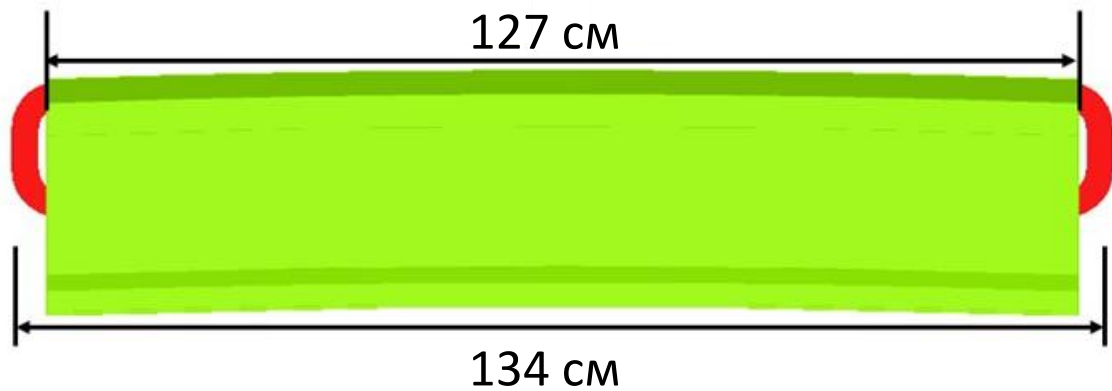
Магнитная система, диполи (High field)



$I, \text{ kA}$	$B, \text{ T}$	$I_{By}, \text{ T}\cdot\text{m}$	$L_{\text{eff}}, \text{ M}$
0	2.126	0.313	0.1472
12.5	2.437	0.400	0.1640



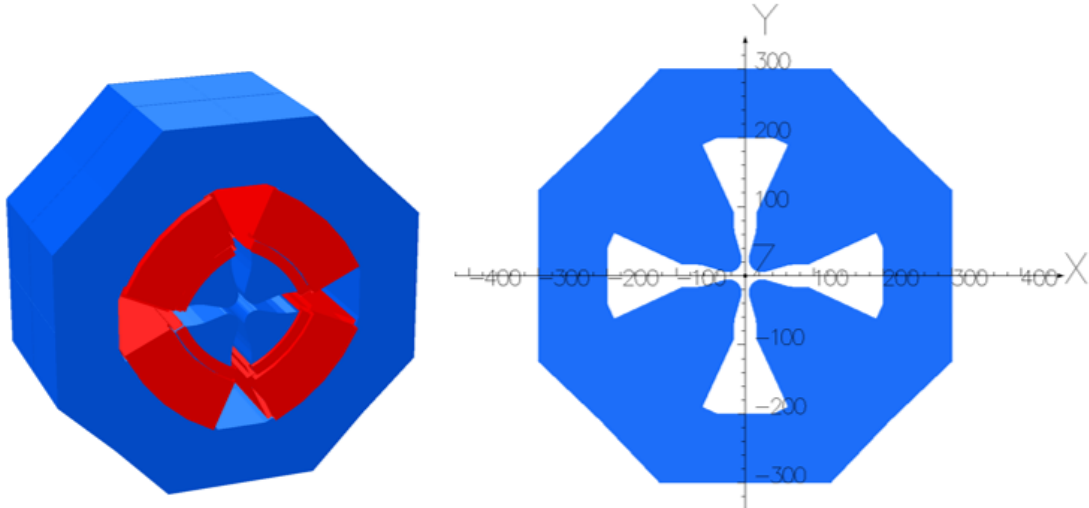
Магнитная система, диполи (Low field)



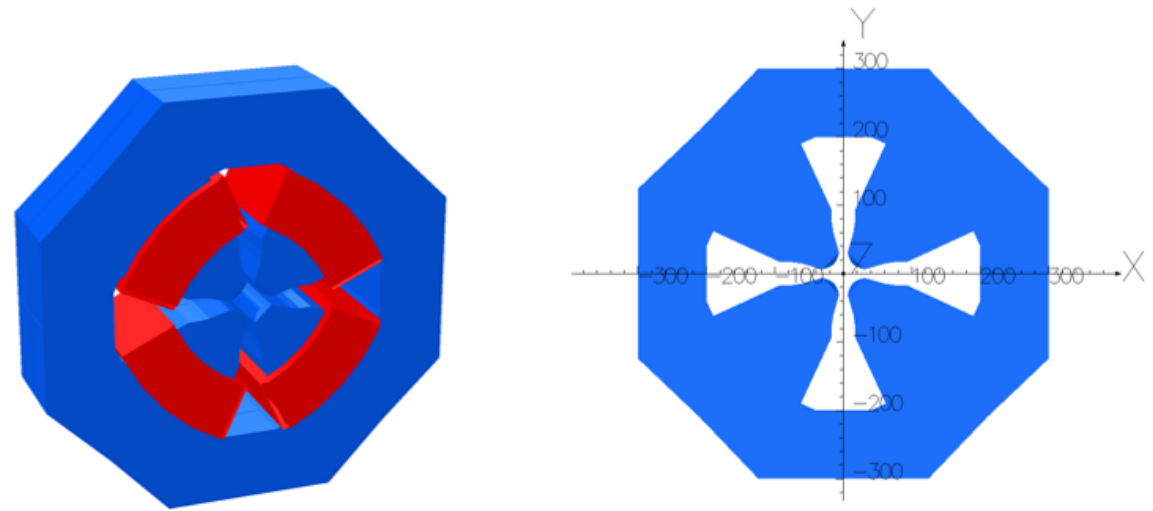
Длина по железу, см	127
Эффективная длина, см	130.63
Радиус гиперболы полюса, см	4.68
Радиус поворота, м	18
Длина с катушками, см	~134
Поле в зазоре, Т	0.556
Градиент, Т/м	-7.541

Ток, ампер витки	6759.72
Плотность тока, А/см ²	665.4
Длина, см	274.2296
Толщина, см	3.1873
Ширина, см	3.1873

Магнитная система (квадруполи)

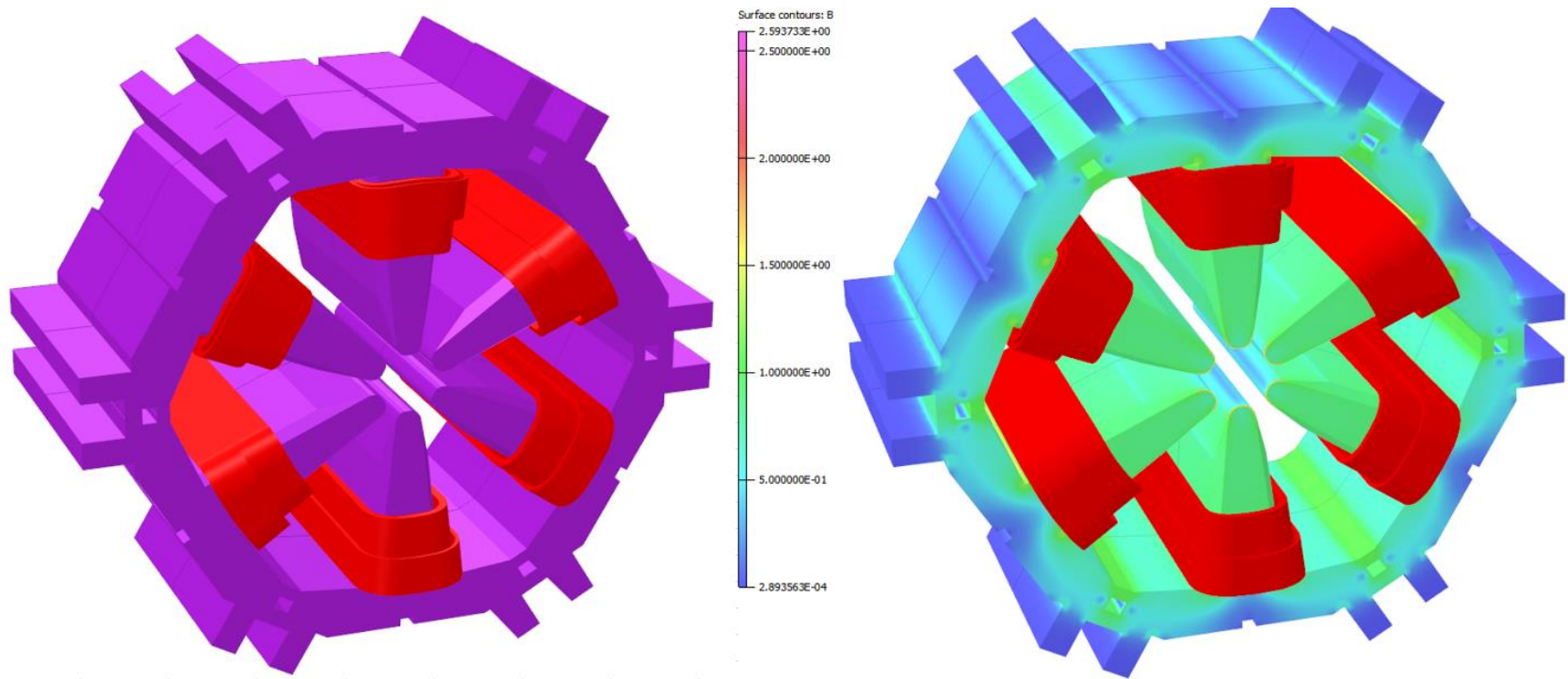


I	кА	5.18
R апертуры	мм	15
G	Т/м	53.82
Интеграл G	Т	16.744
L _{eff}	м	0.311
L ярма	м	0.294

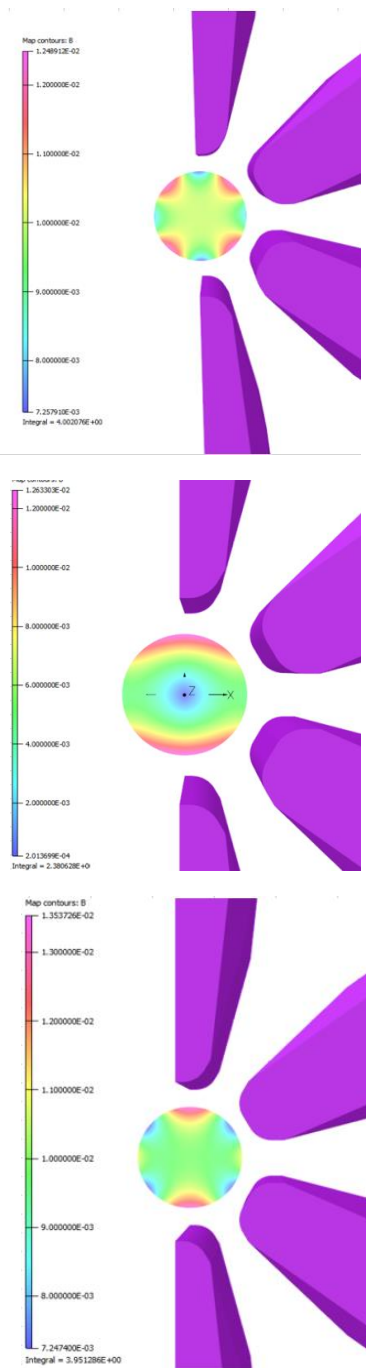


I	кА	9
R апертуры	мм	20
G	Т/м	50.1
Инт. G	Т	8.03
L _{eff}	м	0.1602
B ₀ (-7мм)	Т	0.35
L ярма	м	0.144

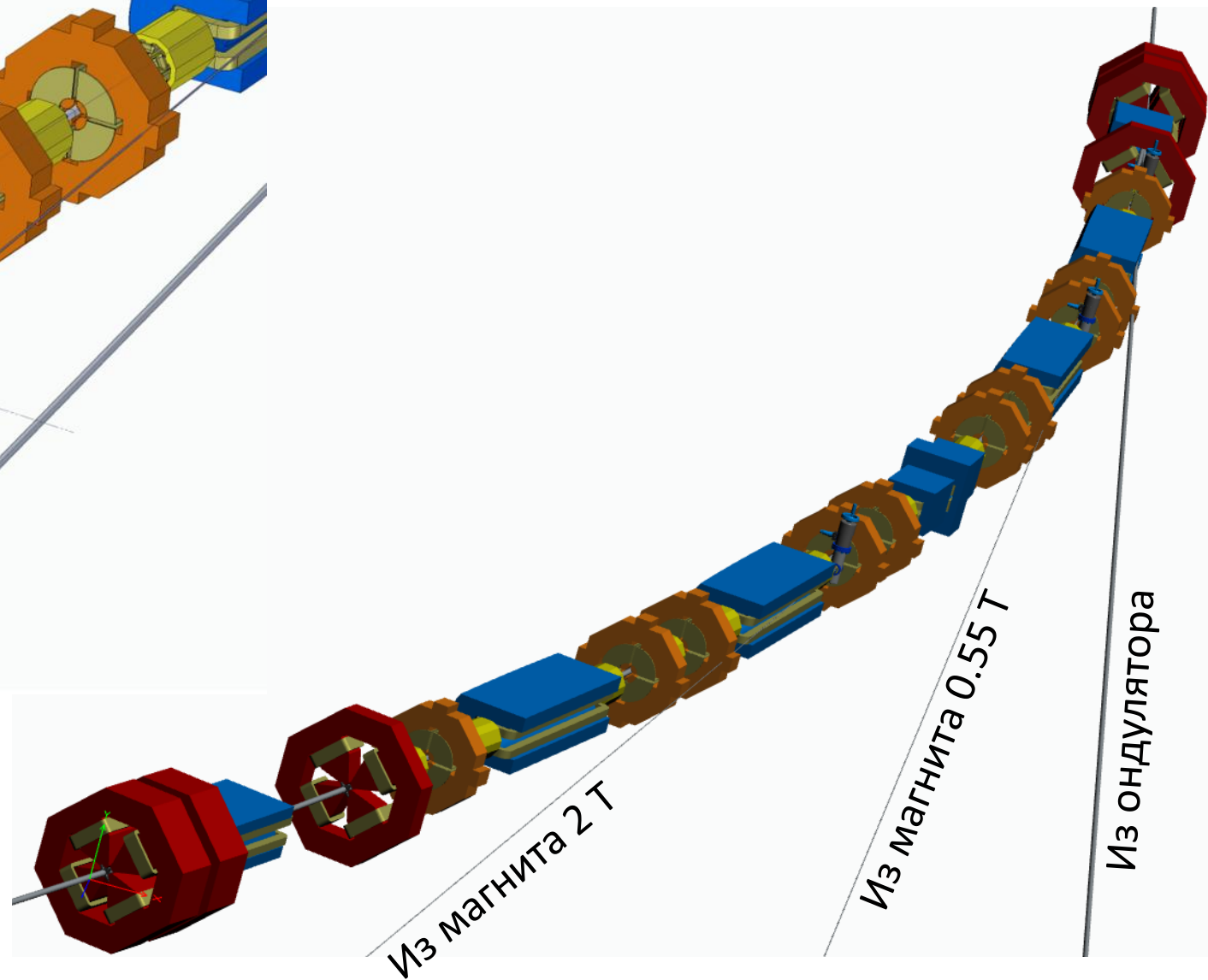
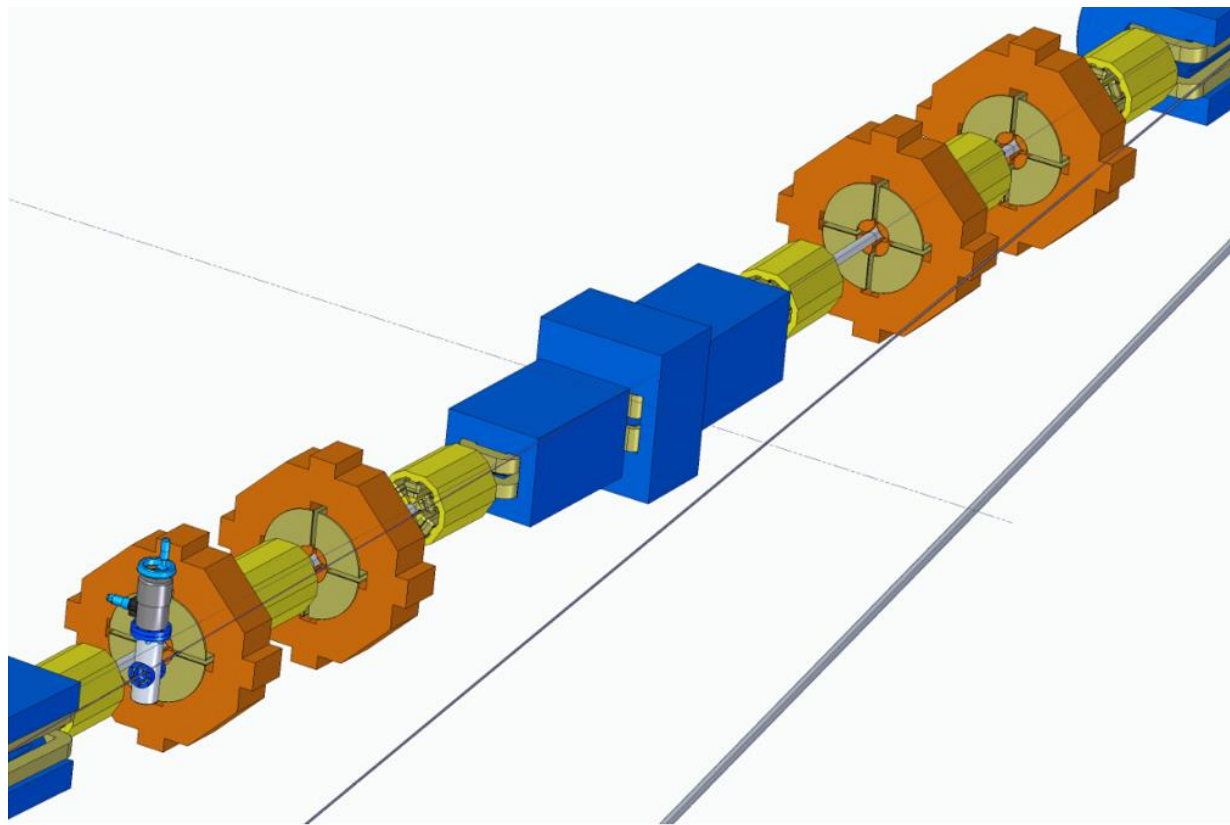
Магнитная система (секступоли)



Длина L (мм)	150
Эффективная длина L_{eff} (мм)	157.2
Вписанный радиус r_{in} (мм)	15
Ампервитков Iw (Ав)	1275
B'' (Т/м ²)	2862

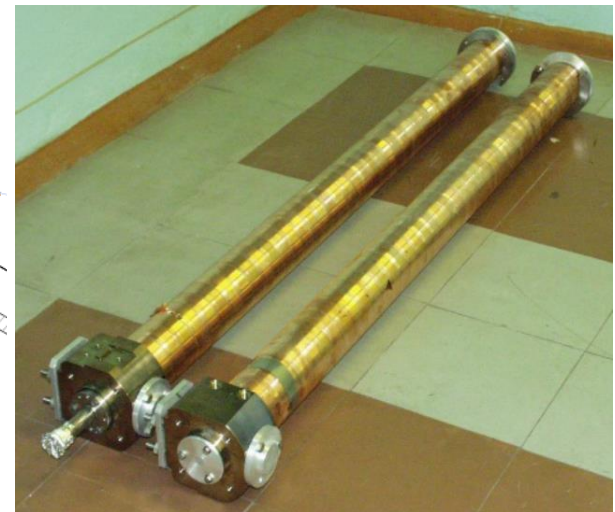
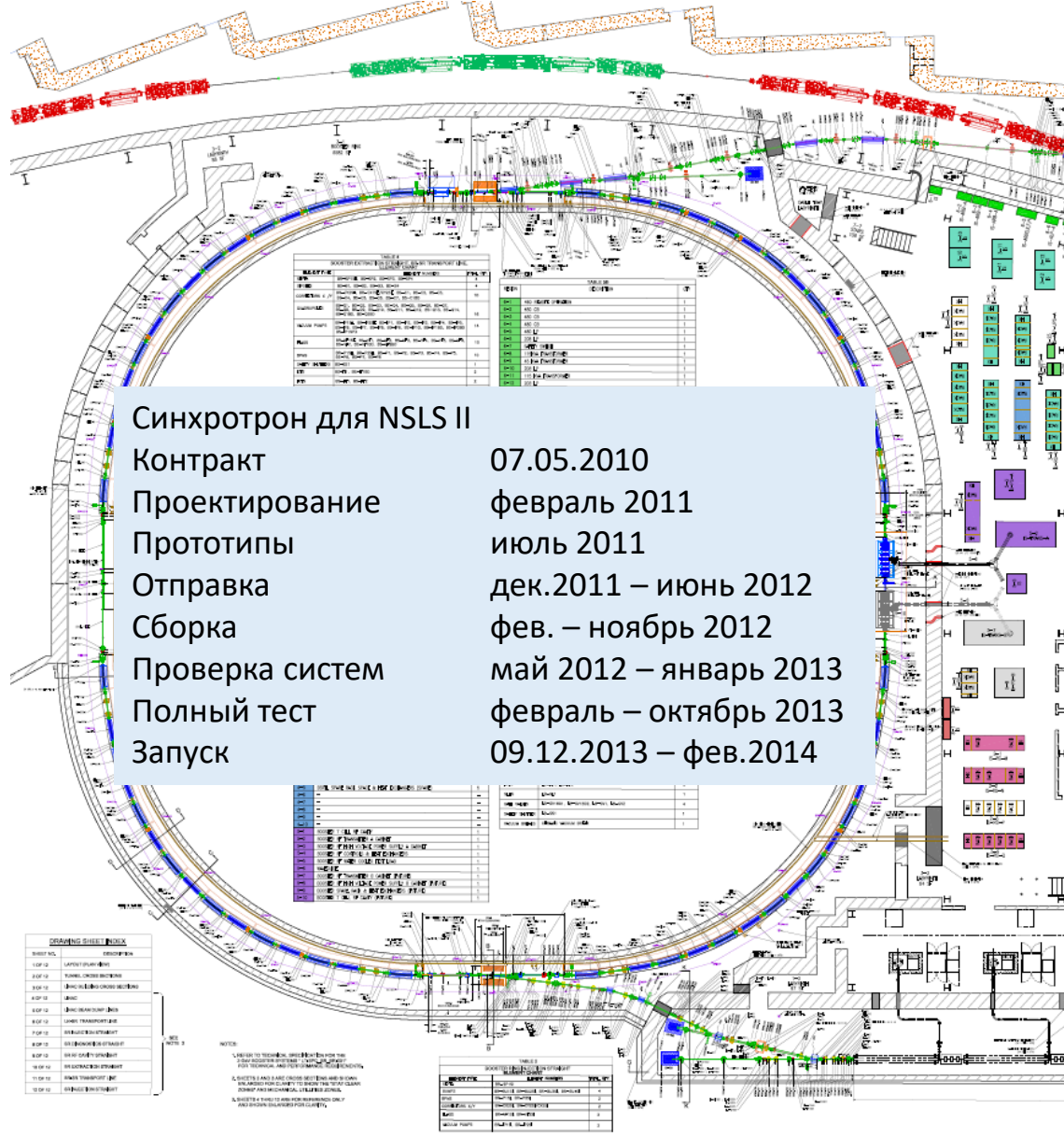


3D модель

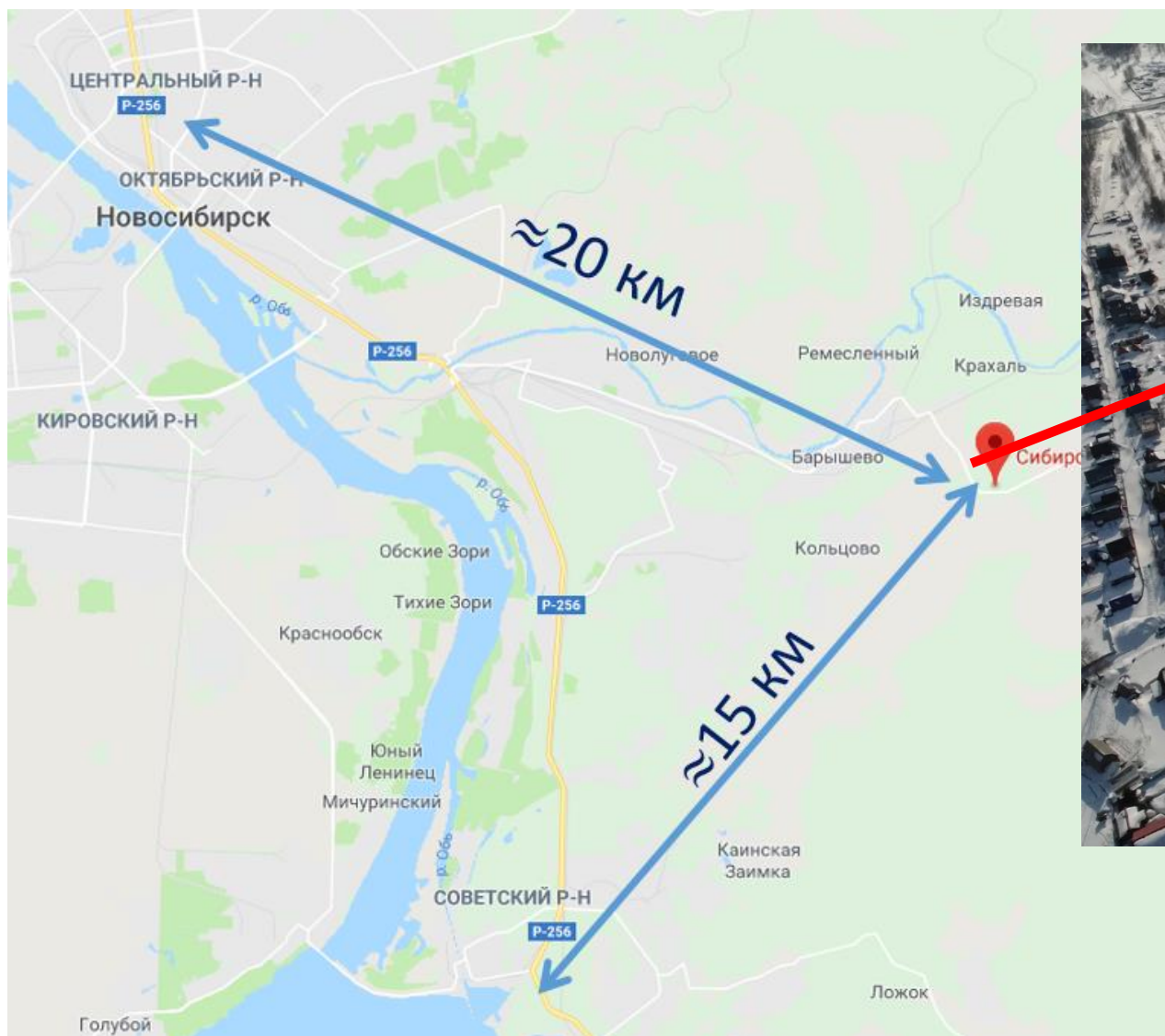


Инжектор

- Линак 150-200 МэВ
- Бустерный синхротрон (3 ГэВ, 158.7 м)



Расположение



Заключение

- Готов физический проект источника СИ 4+ СИ СКИФ (3 ГэВ, 476 м, ≈ 75 пм при нулевом токе, $\kappa = 0\%$... ≈ 40 пм, 400 мА, 510 сгустков, 2 СП вигглера, 3-хкратное увеличение длины сгустка, $\kappa = 100\%$).
- 16 промежутков (из них 14 для IDs) двух типов: 6 м ($\beta_x = 12.2$ м, $\beta_y = 2$ м) для инжекции, резонаторов и ондуляторов, и 4.24 м ($\beta_x = 0.57$ м, $\beta_y = 2.4$ м) для сильнополевых вигглеров.
- Предполагается 30 каналов вывода СИ. 14 из IDs, 8 из сильнополевых магнитов (1.8 Т) и 8 из регулярных магнитов (0.5 Т).
- Поперечная динамическая апертура достаточна для простой и эффективной инжекции. Продольная апертура достаточна для обеспечения требуемого времени жизни (всего два семейства идентичных секступольных линз!).
- Начато проектирование основных систем и элементов накопителя. Упор на простоту и высокую серийность.
- Инжектор (линак, бустер) готов к производству. Идут переговоры с потенциальными поставщиками.
- Начаты проектно-изыскательские работы.