



Ускорительный комплекс У-70: состав, возможности и проекты развития

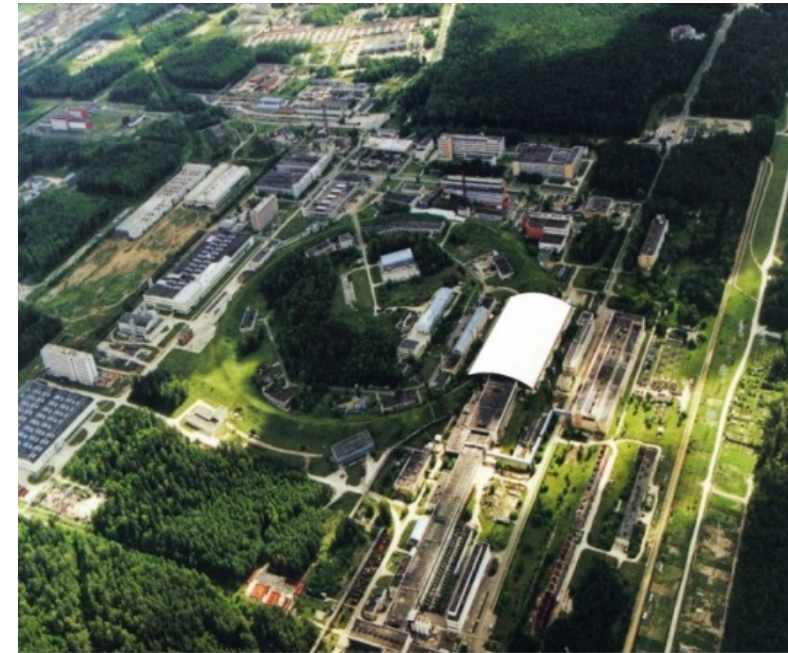
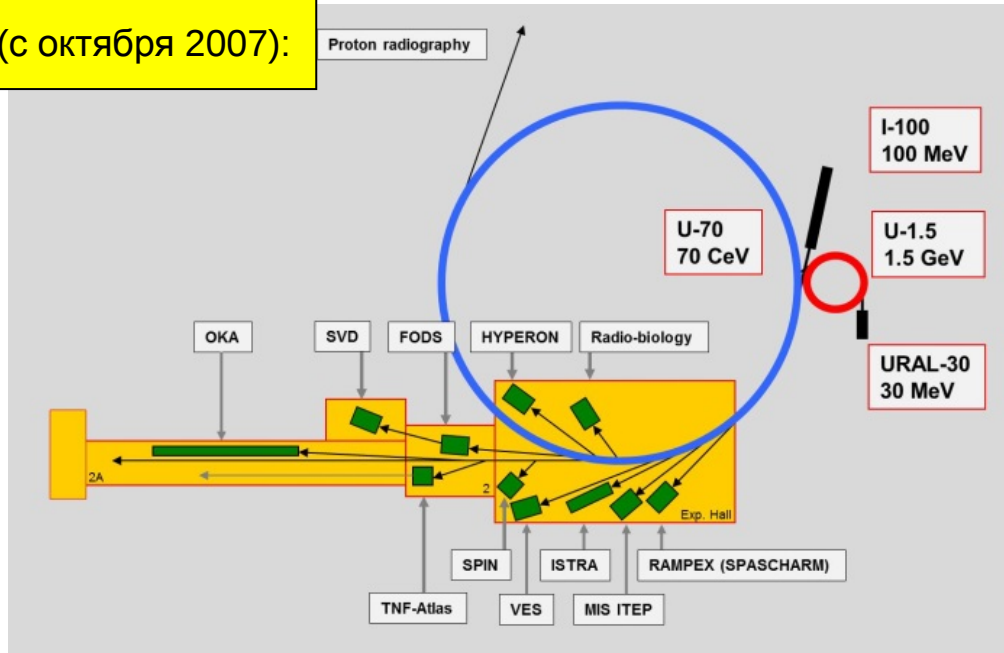
С.В. Иванов

научный руководитель по ускорительным технологиям
НИЦ КИ - ИФВЭ (Протвино)

Семинар ОФВЭ НИЦ КИ - ПИЯФ
22 апреля 2025 года

- Общие положения
- Ускорительный комплекс У-70 НИЦ КИ - ИФВЭ
 - состав
 - работа в сеансах
 - установки, технологические системы, ускорение, вывод пучка
 - фундаментальные и прикладные исследования
 - планы и проекты развития
- Заключение

4 установки (с октября 2007):



1БВ: 156 × 96 м²

Распоряжением Правительства РФ от 30 декабря 2009 года № 2125-р **УК У-70** включен в «Перечень уникальных ядерно-физических установок, необходимых для ... НИЦ КИ ...».

- каскад из 4-х резонансных УЗЧ — двух линейных (И-100, ЛУ-30) и двух кольцевых (У-15, **У-70**),
- сеть (> 1.5 км суммарно) каналов транспортировки и формирования пучков частиц,
- экспериментальные физические установки (fixed-target) (**ФИ**: ОКА, ВЕС, ФОДС, СПИН, СПАСЧАРМ, ГИПЕРОН, ИСТРА, **ПИ**: ПРГК-100, РБС)

- **УНУ** «У-70», **ЦКП** «ОЦ - У-1.5», **ЦКП** «РБС - У-70» .

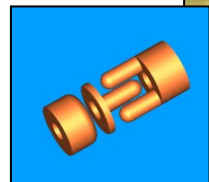
- 1 римская миля = 1000 двойных римских шагов = **1483.5 м**
- 1 длина орбиты синхротрона У-70 = **1483.7 м**

Моды:

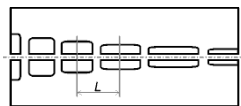
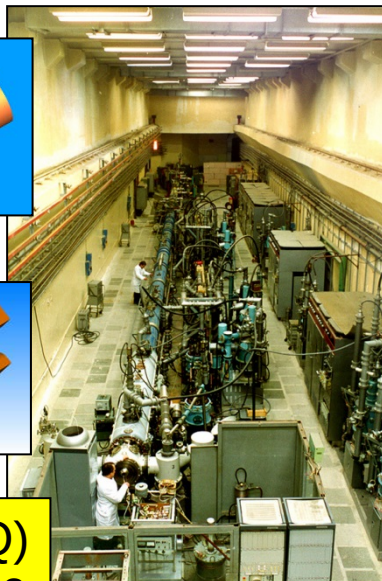
- протонная (основная, [30], 50-70 ГэВ) УРАЛ-30 / У-1.5 / У-70
- (легко)ионная (С, комплементарная) И-100 (2 из 3) / У-1.5 / У-70

Ядра углерода:

- высокой энергии 24.1-34.1 ГэВ/нуклон
- **промежуточной энергии 455-200 МэВ/нуклон**



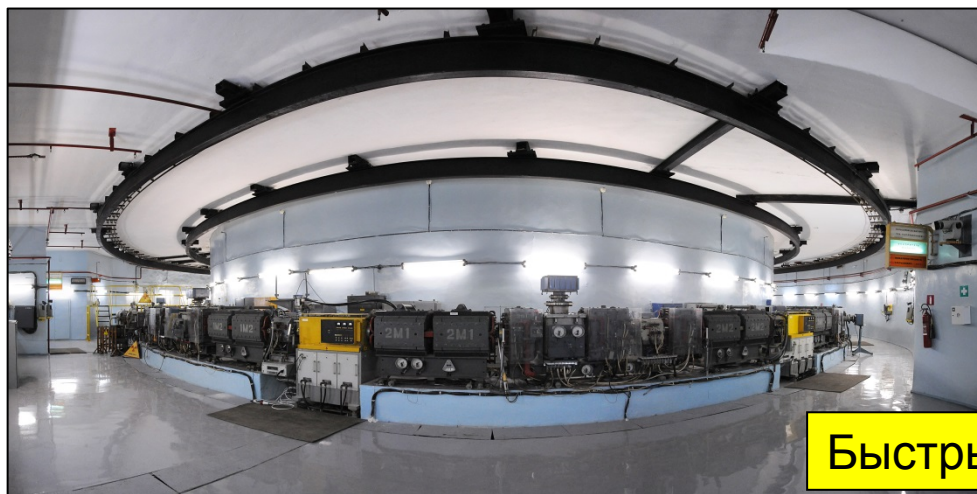
ЛУ (RFQ)
УРАЛ-30



ЛУ (Alvarez)
И-100

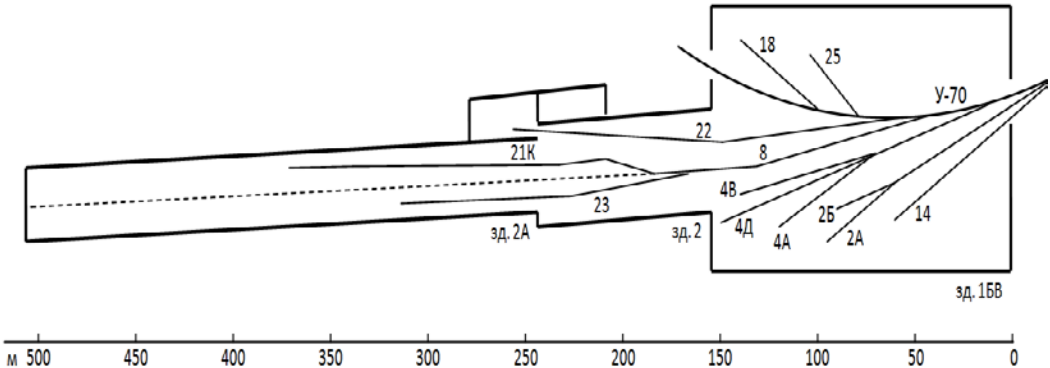


Большой ПС У-70



Быстрый ПС бустер У-1.5

Номер канала	Длина всех участков канала, м	Количество МОЭ	Назначение, сорт частиц, энергия/импульс
2 (2А, 2Б), 14	200	20	h^- (40–65 ГэВ/с), $e^\pm$ (< 40 ГэВ/с)
4 (4А, 4В, 4Д)	250	21	h^- (25–40 ГэВ/с), $e^\pm$ (< 40 ГэВ/с)
18	50	7	$h^\pm$ (5–15 ГэВ/с)
8	60	9	p (< 70 ГэВ/с)
22	180	16	p (< 70 ГэВ/с), $h^\pm$ (7–60 ГэВ/с), $e^\pm$, $p(\Lambda)$ (< 40 ГэВ/с), C_{12} (< 35 ГэВ/н)
23	140	13	$h^\pm$ (< 35 ГэВ/с)
21К	200	26	$h^\pm$ (5.0, 12.5, 17.7 ГэВ/с)
25	35	11	C_{12} (200–450 МэВ/н)



к 8 и 23



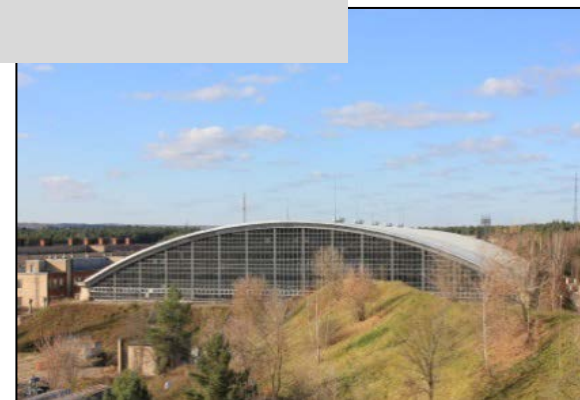
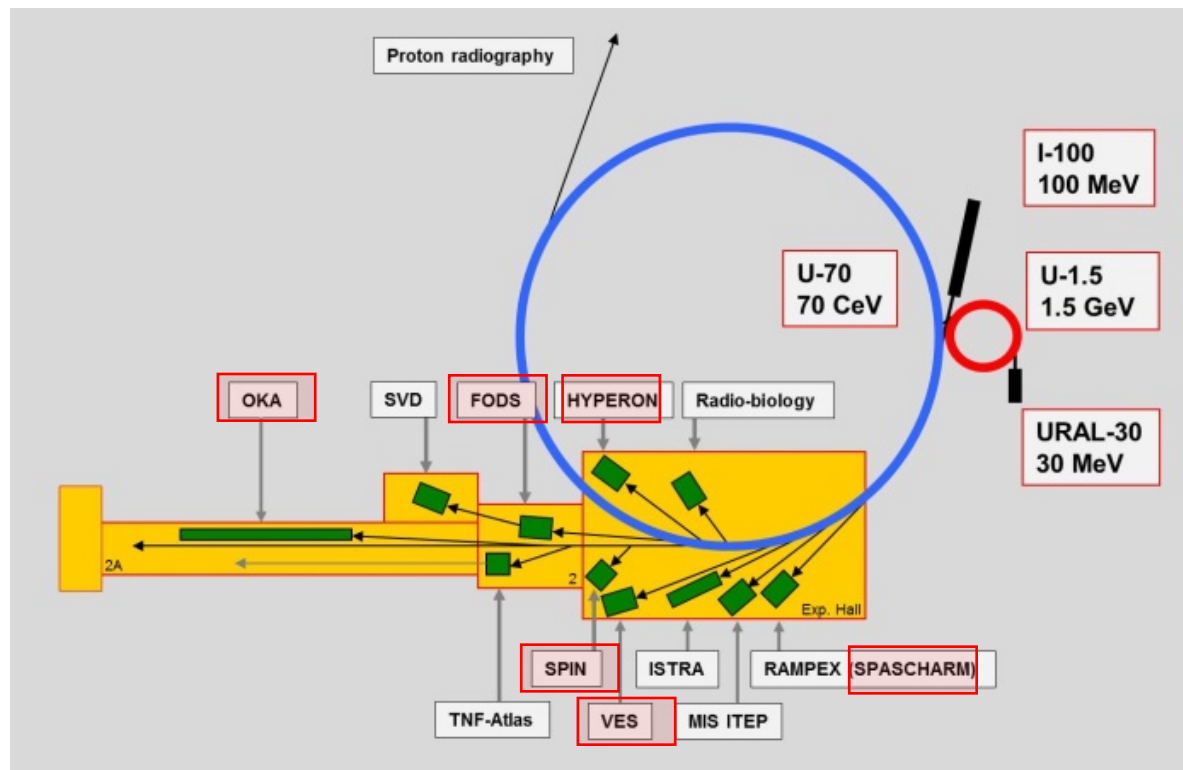
к 21



ПРГК-100



к 25



Пучки p , π , K , e , ν , C

Области ФВЭ:

- h -спектроскопия
- спиновые явления
- редкие распады K -мезонов
- h -А взаимодействия
- релятивистская ЯФ
- [физика ν]

Прикладные:

- p радиография
- C радиобиология
- ...

Сотрудничество (ЦКП):
ИФВЭ, ИТЭФ, ОИЯИ,
ИЯИ, ПИЯФ, ИЯФ СО,
НИИЯФ МГУ, НИЯУ
МИФИ, ЦЕРН, ...
РФЯЦ ВНИИЭФ, МРНЦ
НМИРЦ, ИТЭБ...

Ускорительный комплекс У-70 (реестр ПП РФ 30.12.2009 № 2125-р):

- 4 УЗЧ (2 кольцевых (1.5 + 0.1 км) и 2 линейных (80 и 30 м) = ЭФУ
- 6 (8) экспериментальных физических установок
- сеть каналов транспортировки пучка (1.1 км суммарно)

- 27 ЗУ, общая площадь 2533 Га
- **ТПП У-70:** 1.3×1.3 км² 182,2 [225.5] Га
- 463 ОнДИ 627 ОЦДИ
- > 1240 сотрудников

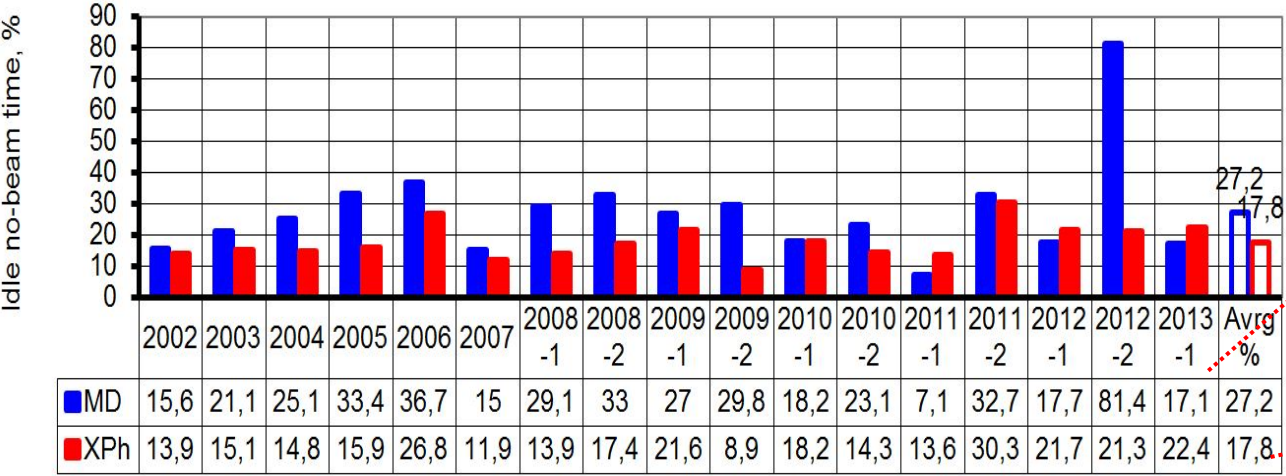
23 МВт
7 МВт
30 МВт

- | | |
|----------------------------|---------|
| • Бюджет 2017-2024 (план) | --13.5% |
| • Рост тарифов (2017-2023) | +45% |
| • Материалы | < 1% |

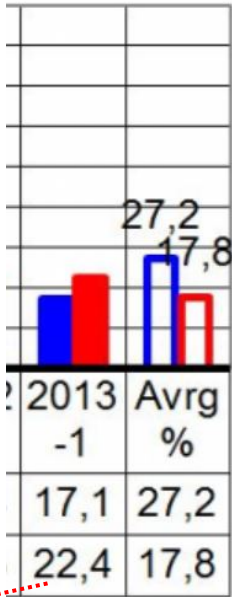
Рег. № 720000Ф.99.1Б392АА01000 (реестр ГЗ)
«Обеспечение функционирования уникальных научных установок» (Уникальная научная установка – «Ускорительный комплекс У-70 с каналами транспортировки пучков и экспериментальными физическими установками»)

Финансово-экономическое обоснование дополнительной потребности в финансировании мероприятий по модернизации Ускорительного комплекса У-70 (протонного синхротрона У-70 НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ, г. Протвино Московской области

Действующий ускоритель



MD
XPh



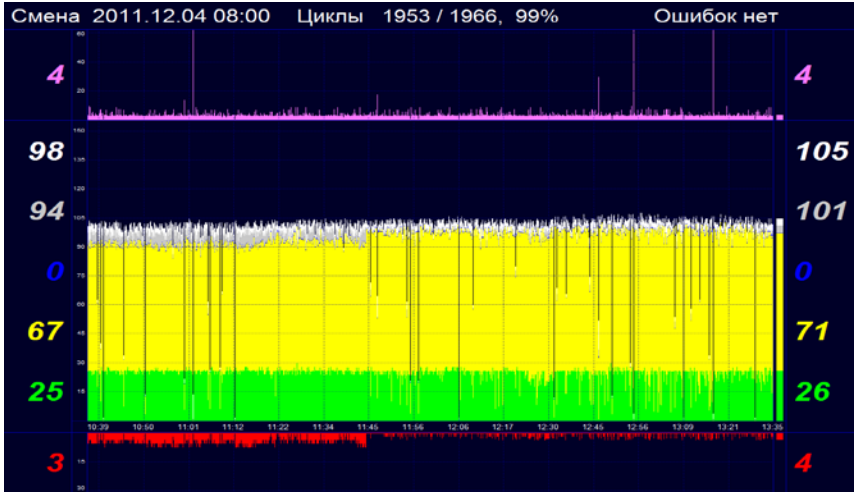
Run

04 дек 2011

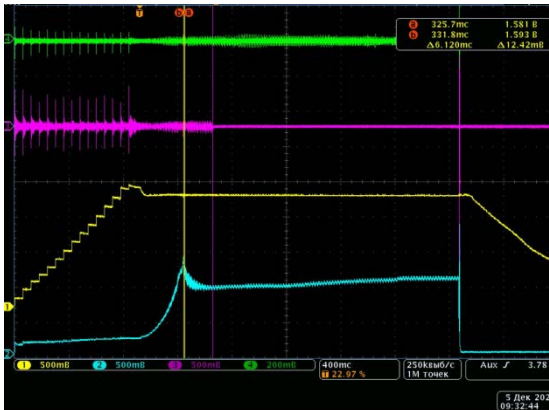
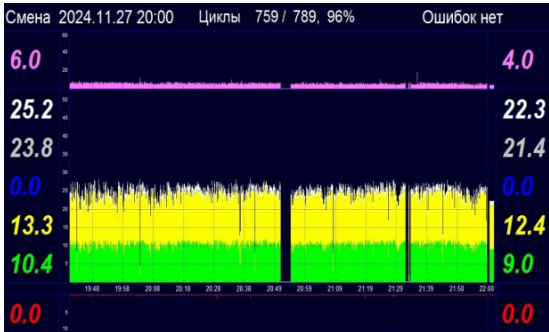
1·10¹³ ppp

- 2 сеанса (7/24) в год:
- короткий (XPh 10 дн) 2 MD(p) + ионы
 - длинный (XPh 30 дн) 3 MD(p) + ионы

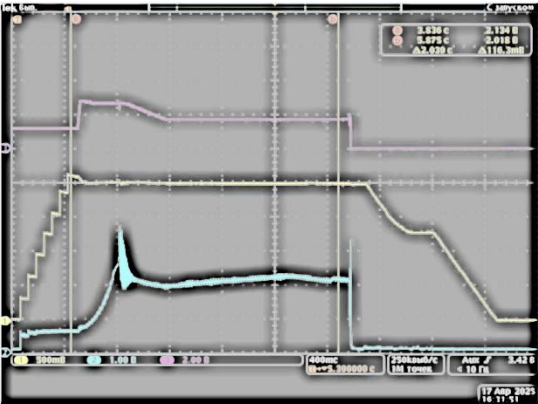
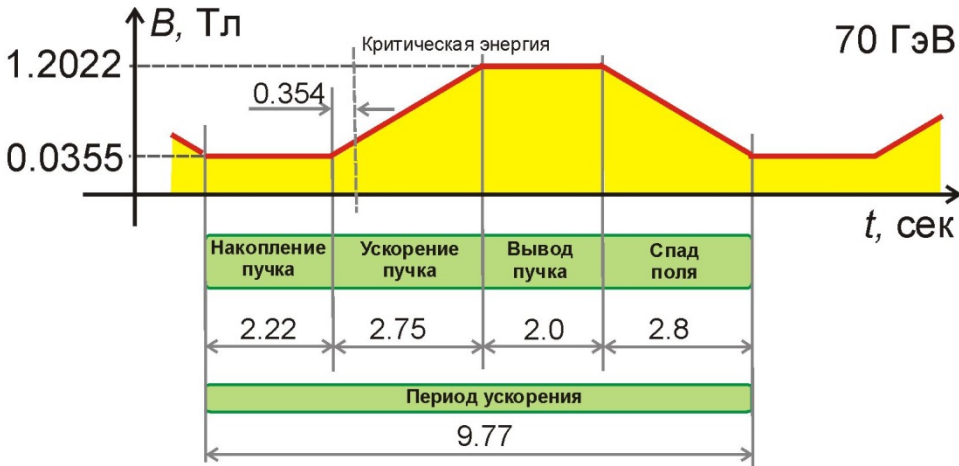
3 ч, 1000 циклов



27 ноя 2024



- Энергия 1.32 – 50/60/70 ГэВ
- Длина орбиты 1483.699 м
- Радиус кривизны 194.125 м
- Магнитная жесткость $B\rho$ 233 Тл·м (max)
- Интенсивность $< 1.4 \cdot 10^{13}$ р/ импульс
- Частота циклов примерно 0.1 Гц
- 1-2 сеанса/ год, длительность 1000-1500 ч
- Простои и пропуски, ФП, 24/7 $< 15\%$



120 диполей (СФ)

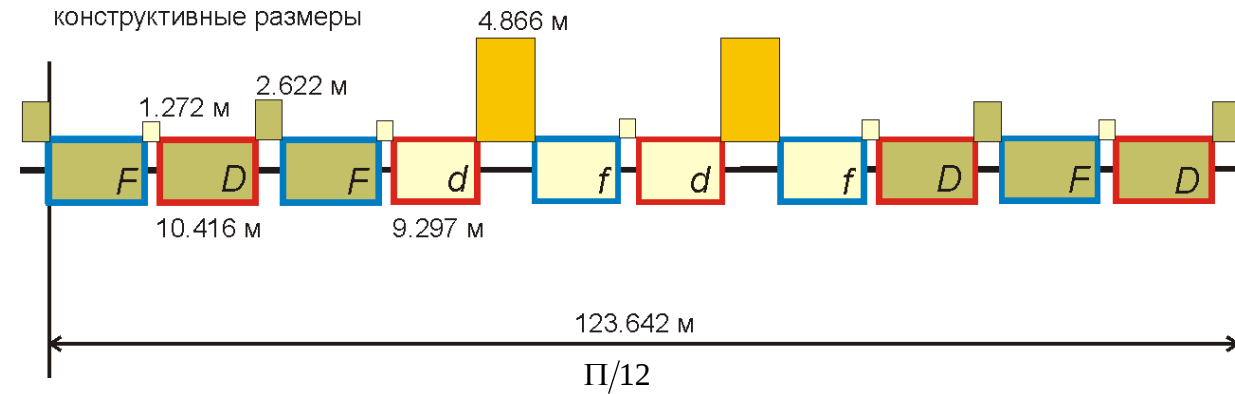
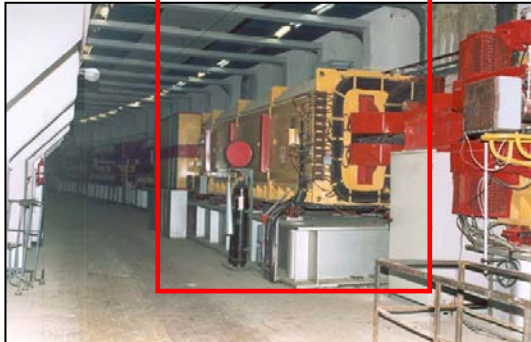
FODO

60 периодов

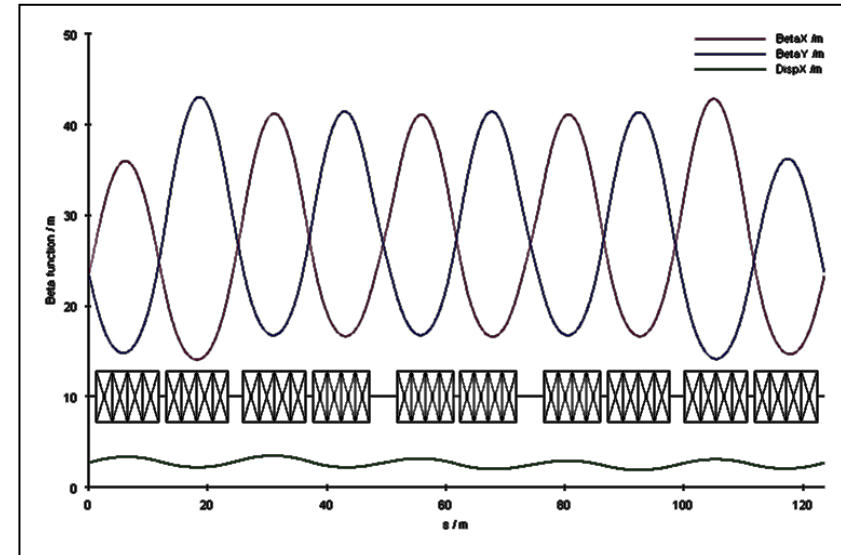
12 супер периодов

РТ (9.9Н, 9.8V)

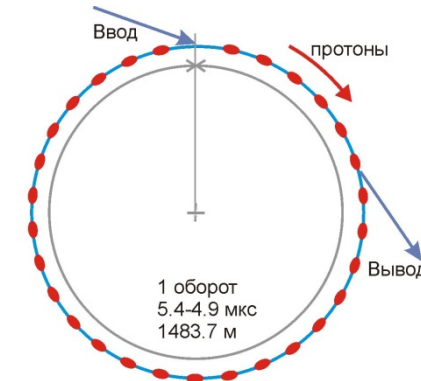
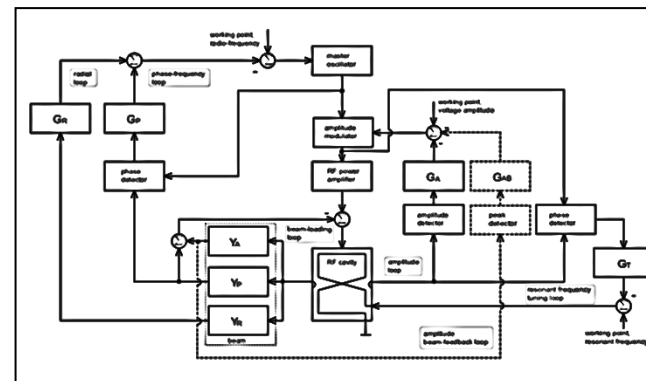
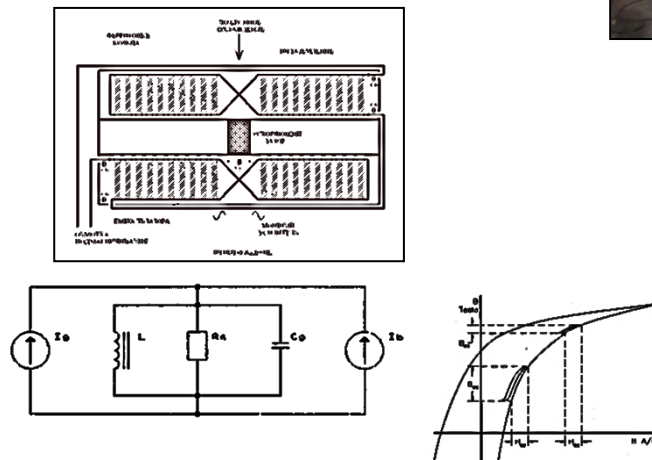
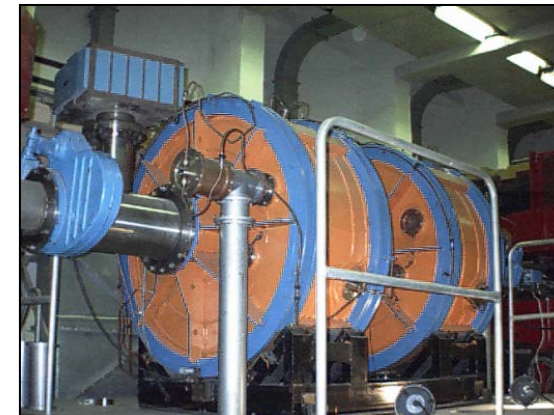
216 (195) т



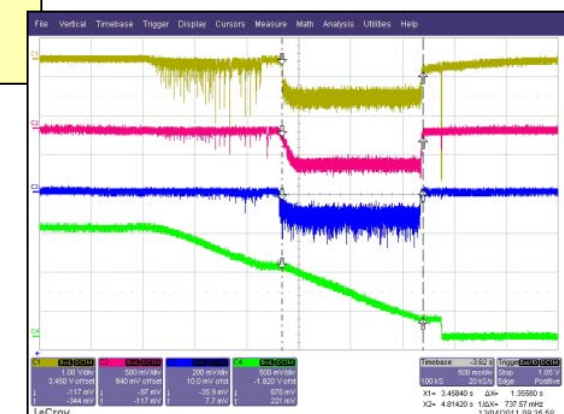
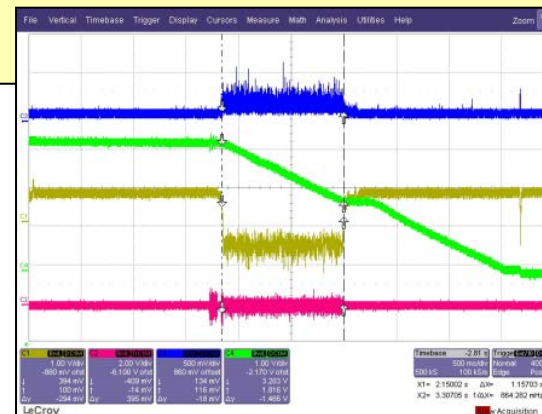
$$\frac{2\pi\rho}{\Pi} = \frac{2\pi \cdot 194.125 \text{ м}}{1483.699 \text{ м}} \cong 82\%$$

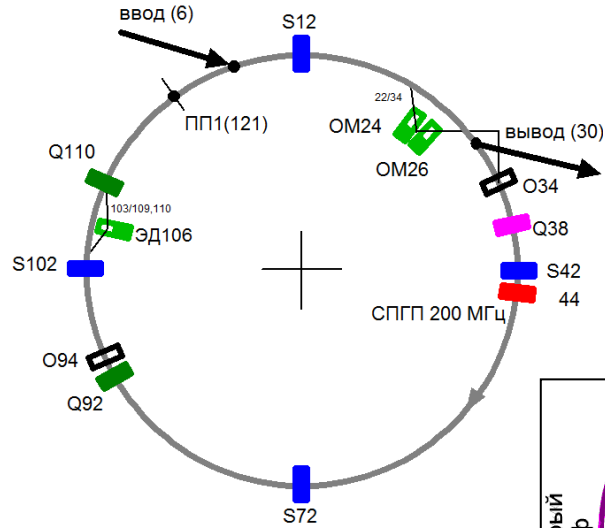


- 40 (38) резонаторов с ферритовым заполнением (5.52 – 6.06 МГц, протоны), max 10 кВ/зазор
- Кратность ускорения 30
- Вспомогательная ВЧ система 200 МГц (2 резонатора), 450 кВ в сумме



- **Быстрый однооборотный**, 1–29 р-сгустков, до $1.1\text{--}1.2 \cdot 10^{13}$ р/ цикл, эффективность около 90%
- **Медленный резонансный**, до $5 \cdot 10^{11}\text{--}1 \cdot 10^{13}$ р/ сброс, длительность до 2–3.5 с при 50 ГэВ
 - Обычный, наведение магнитной оптикой, линза Q38
 - Стохастический, наведение ВЧ шумом на 200 МГц, с 2006 г
- Вторичные частицы с **внутренних мишеней**
- Дефлекторы из **изогнутых кристаллов** (Si), $1 \cdot 10^6\text{--}1 \cdot 10^{12}$ р/ импульс, эффективность до 85-90%
- Медленный вывод ионов на **промежуточной энергии**, углерод 455 -200 МэВ на нуклон
- **Быстрый многооборотный** ...

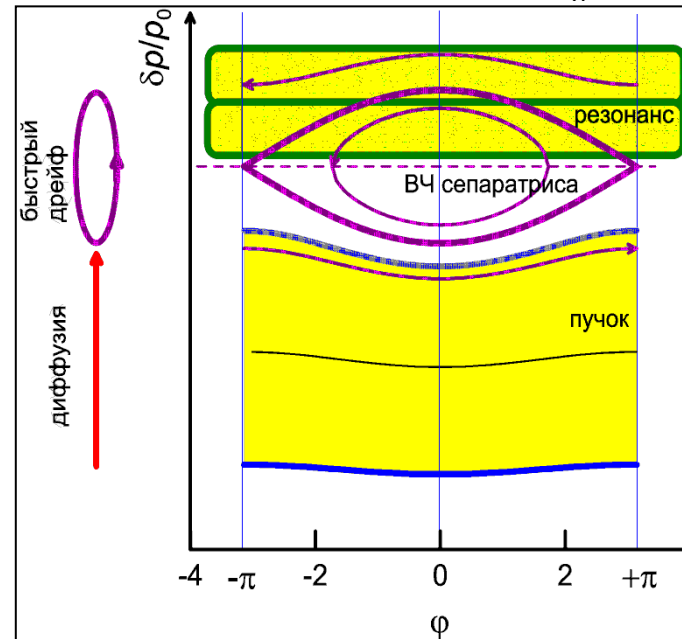




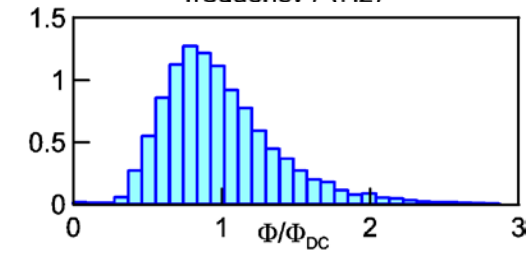
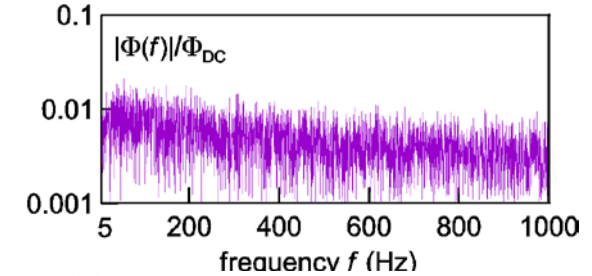
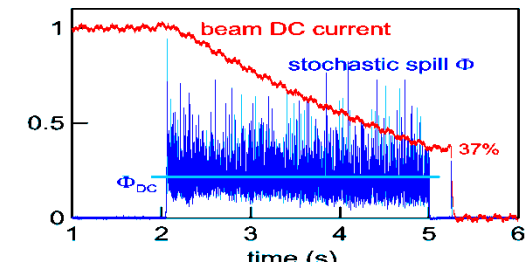
ВЧ система 200 МГц

[CERN Courier
vol 47 no 2
March 2007]:

Горизонтальный резонанс
3-го порядка $3Q_x = 29$

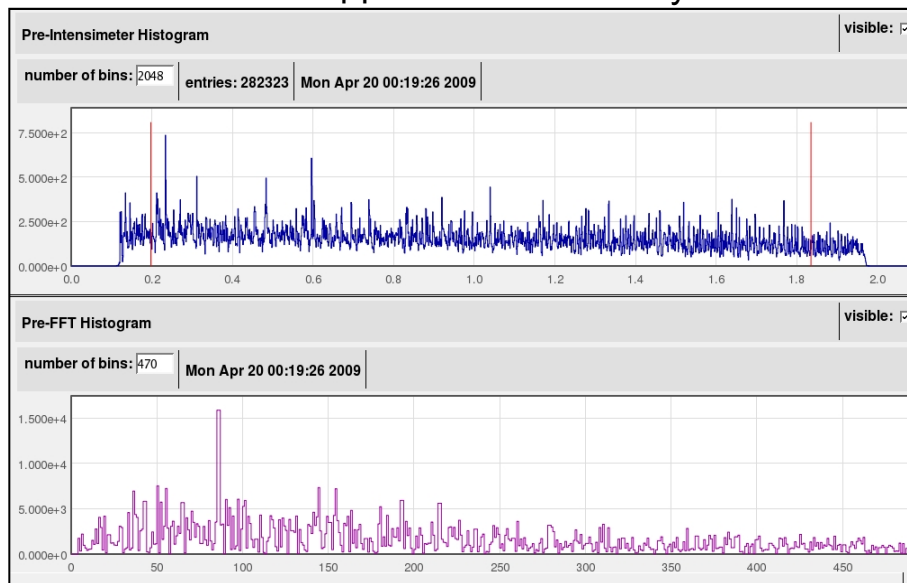


63% in 2.9 s. $\sigma = 0.40$,
duty factor $\langle \Phi \rangle^2 / \langle \Phi^2 \rangle =$
0.87. No lines of mains
harmonics

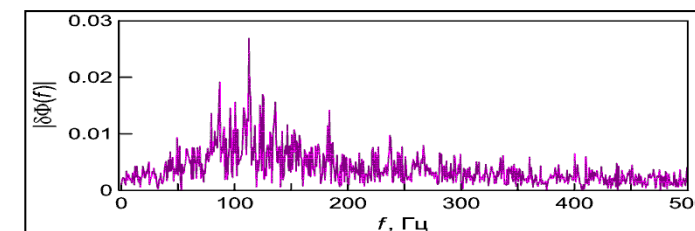
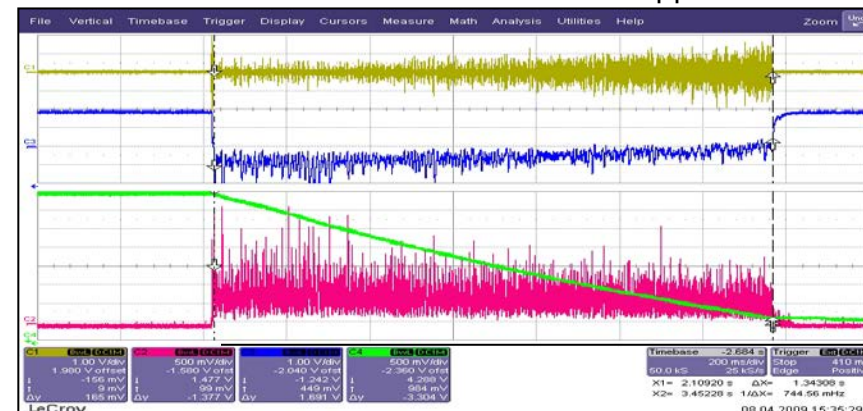


Сеанс 2009/1

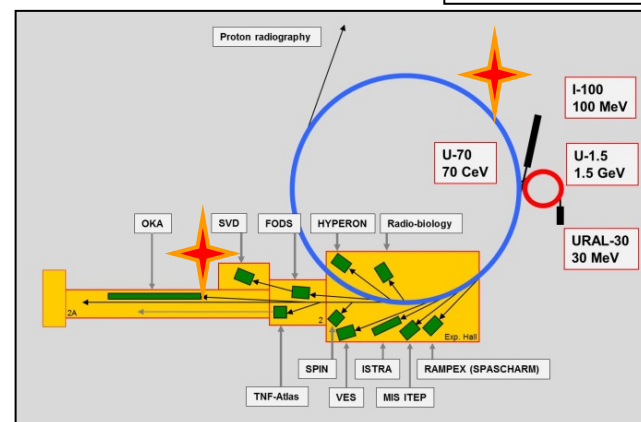
Данные счетчиков установки ОКА

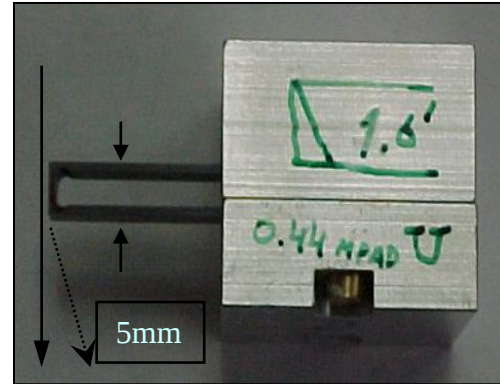
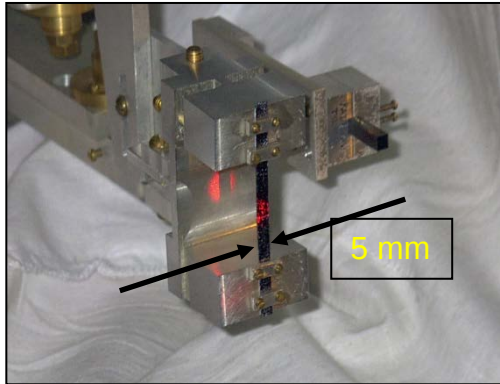


Технологические данные У70

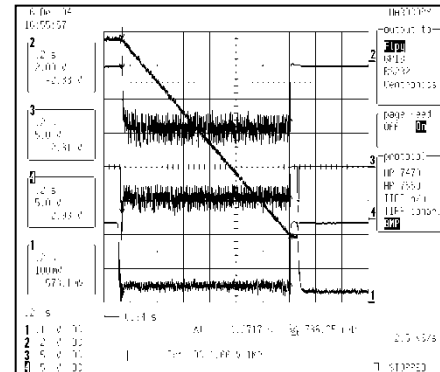
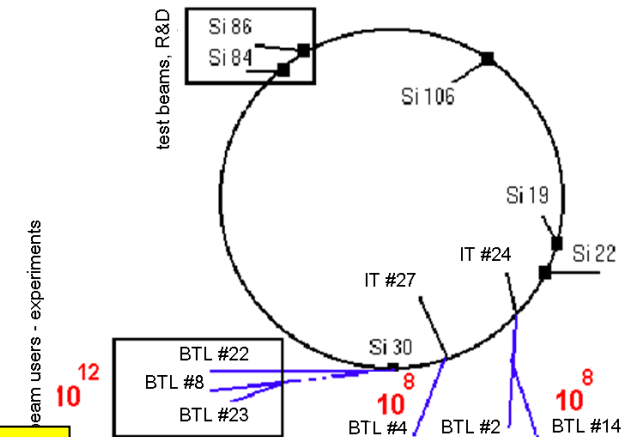


Сброс 1.85 сек
 $0.95 \cdot 10^{13} \rho$ в сбросе
50 ГэВ





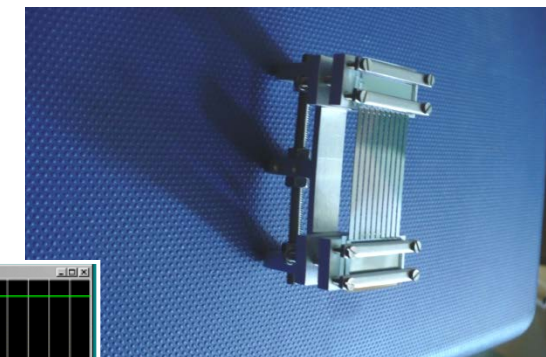
Сеанс 2007: 3 СКД (19, 24, 30)
6 экспериментов



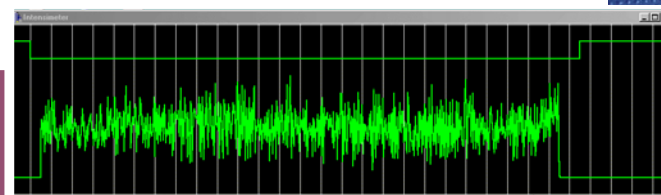
СКД19

BM24

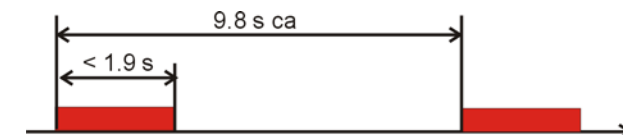
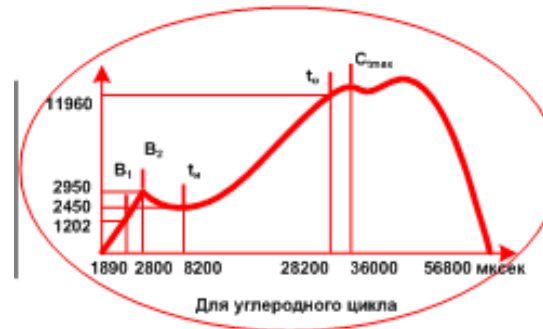
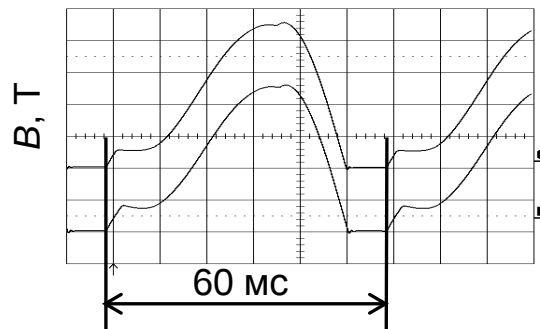
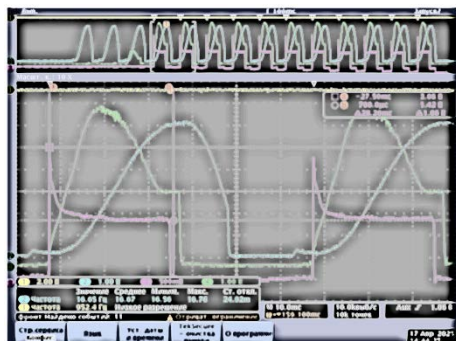
BM27



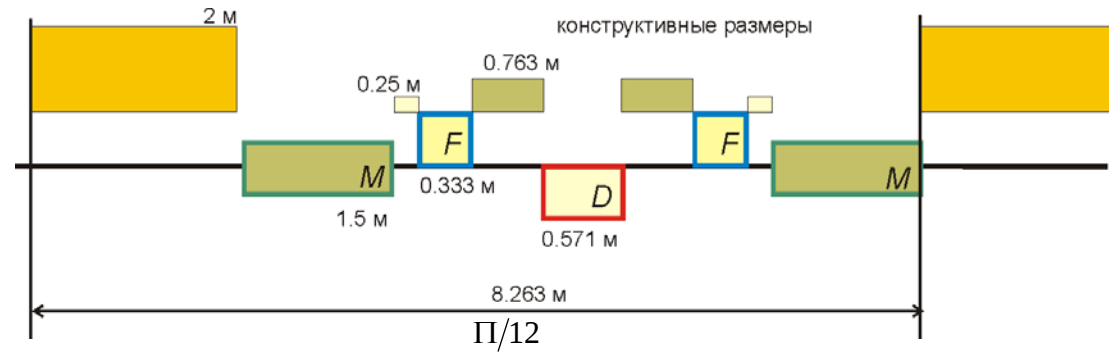
Пучок для эксперимента ИФВЭ-ЦЕРН
по радиационной стойкости жидкого Ar



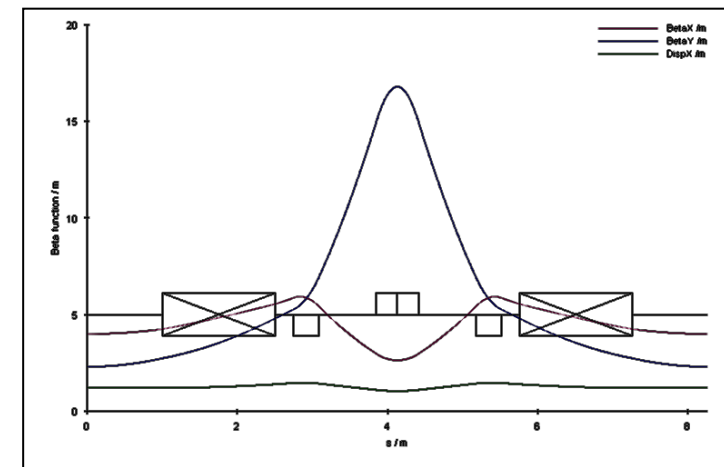
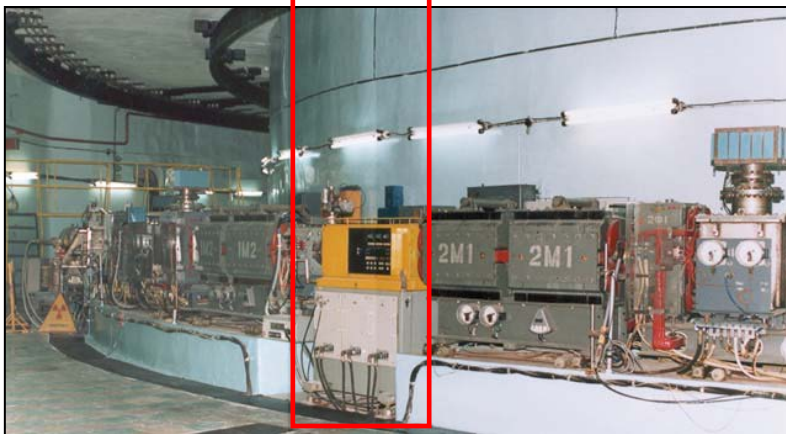
- Энергия 30 МэВ – 1.32 ГэВ
- Длина орбиты 99.16 м
- Радиус кривизны 5.73 м
- Магнитная жесткость $B\rho$ 6.9 Тл·м (max)
- Радиочастота 0.75 – 2.79 МГц
- Кратность ускорения 1
- Интенсивность $2 - 9 \cdot 10^{11}$ р/ цикл
- Частота циклов 16 2/3 Гц
- До 32 импульсов длит. 60 мс @ 0.1 Гц
- Режимы RRM и IRM
- Простои и пропуски < 15 %



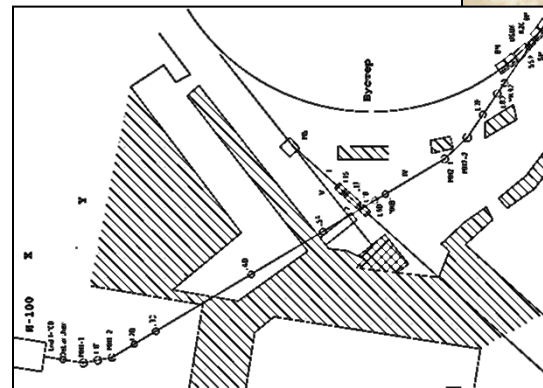
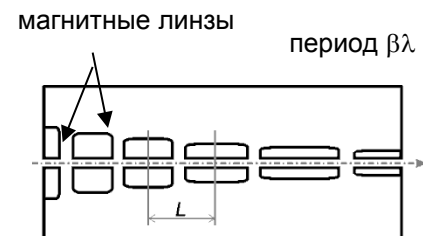
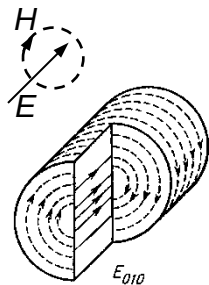
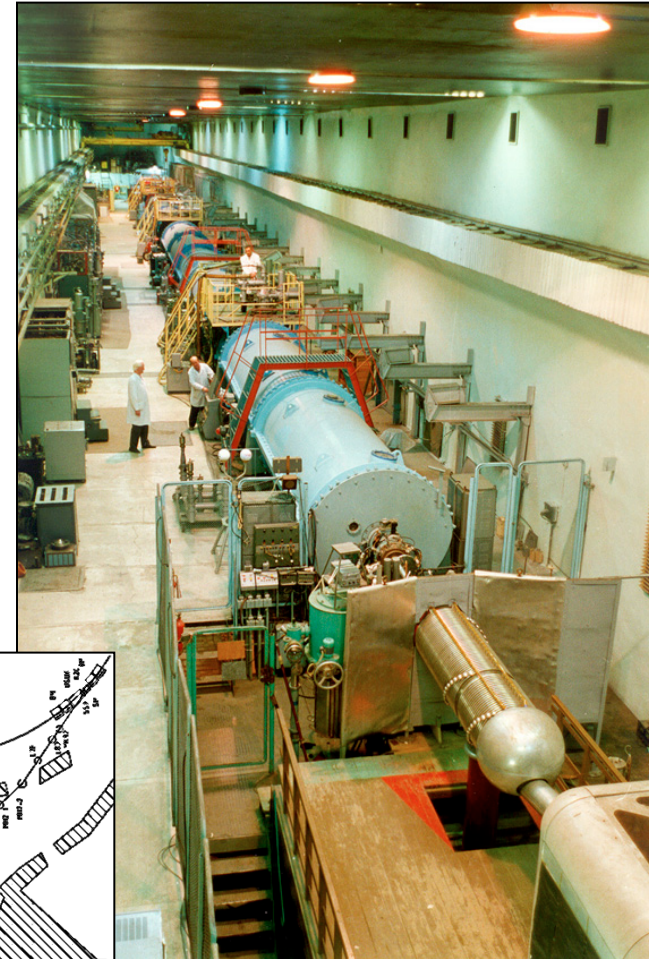
24 диполя, 24 QF, 12 QD
M-FDF-M, 3.75° краевая F
12 периодов
РТ (3.85Н, 3.80V)



8 ВЧ резонаторов с ферритовым заполнением
суммарное напряжение 0.6 — 60 кВ



• Тип	структура Alvarez с ДТ
• Энергия, p	0.7–100 МэВ
• Импульсный ток	100 мА
• Радиочастота	148.5 МГц
• Длительность импульса	12–40 мкс
• Частота импульсов	0.2–1 Гц
• Число резонаторов	3
p - p #1	93+2·½ ДТ, 29.9 м
p - p #2	41+2·½ ДТ, 27.6 м
p - p #3	26+2·½ ДТ, 21.9 м



Разработка ГНЦ ИФВЭ, запуск в 1977, в
эксплуатации с 1983

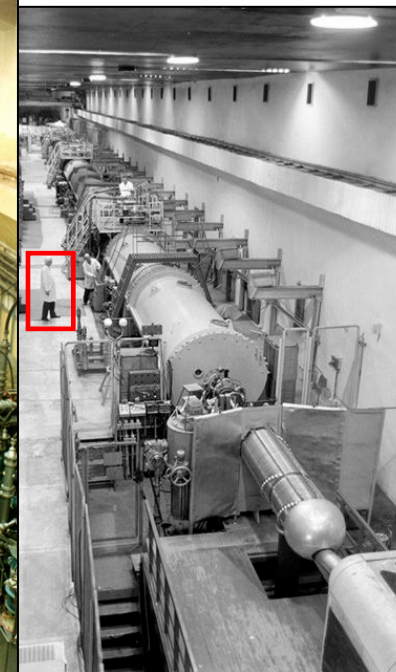
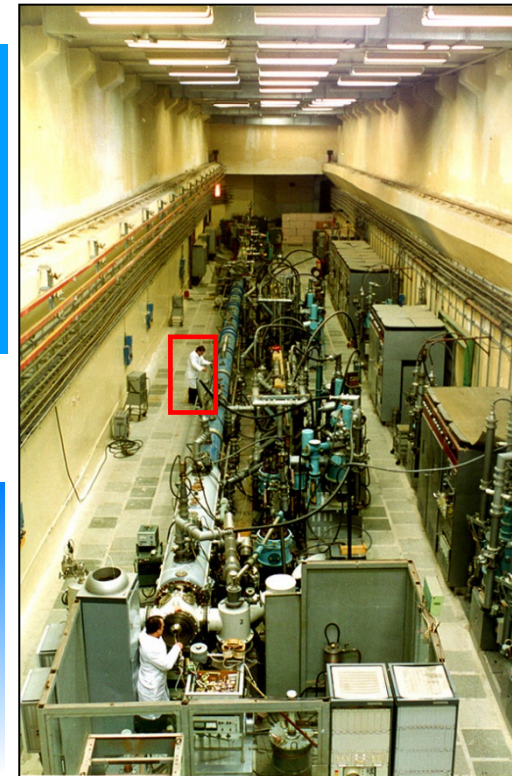
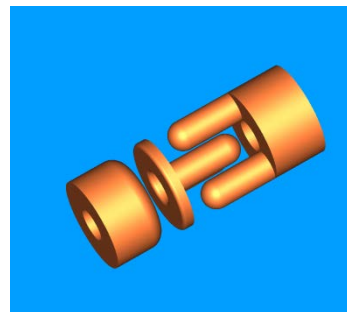
- | | |
|------------------|---|
| • Тип | ПО ВЧКФ + (ПП) ВЧКФ ДТ |
| • Длина | 25.26 м |
| • Энергия, p | 0.1–30 МэВ |
| • Импульсный ток | 30/50/70 мА |
| • Радиочастота | 148.5 МГц |
| • max E-поле | 350 кВ/см, 2–3 Kilpatrick |
| • Длина импульса | 1–10 мкс |
| • Частота циклов | $(32 \times 16 \frac{2}{3} \text{ Гц}) \times 0.1 \text{ Гц}$ |
| • Число секций | 5 |
| • | 0.1–2–9–16–23–30 МэВ |
| • Простои | примерно 3% |



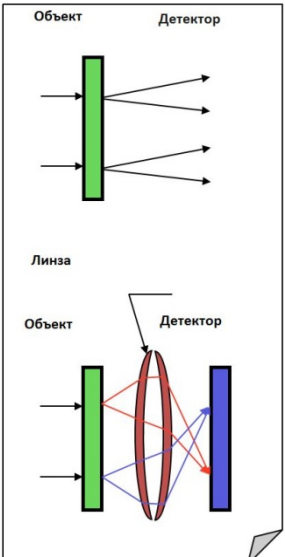
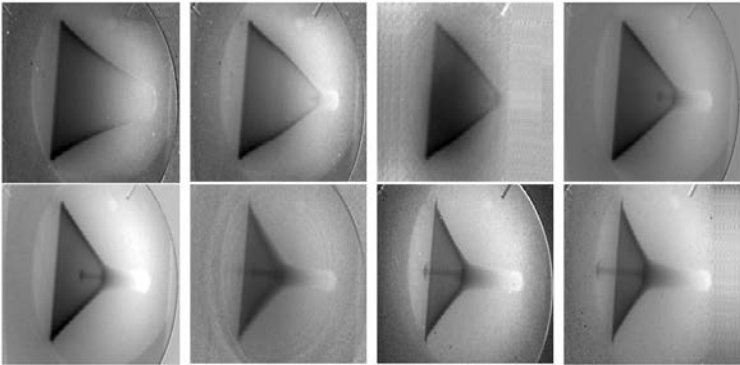
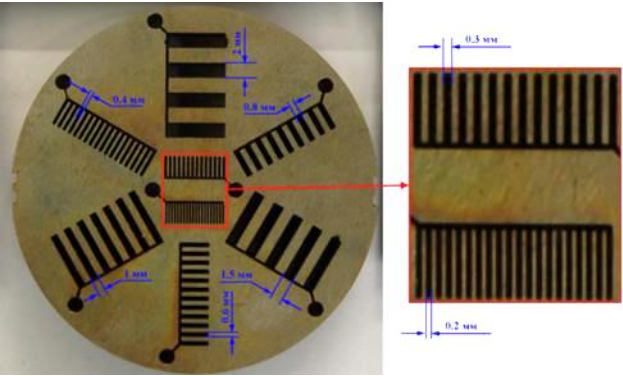
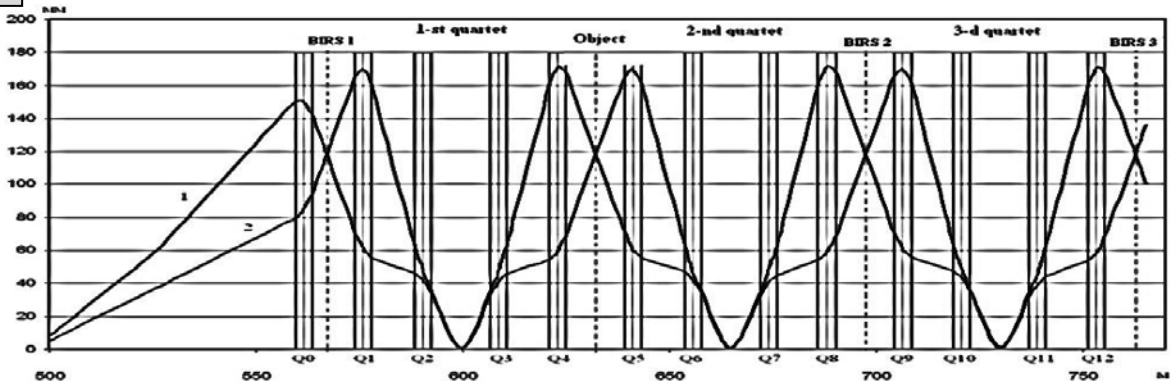
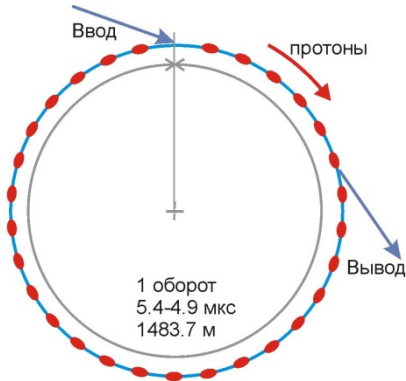
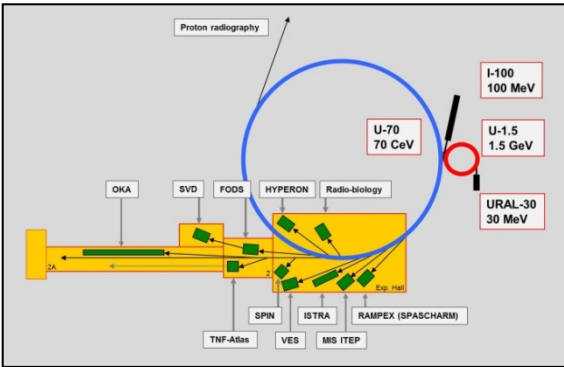
В.А.Тепляков
(1925-2009)

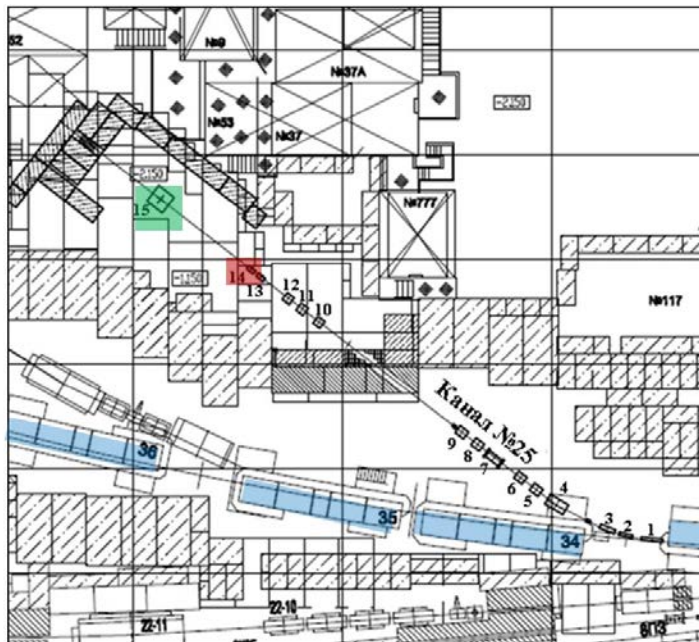
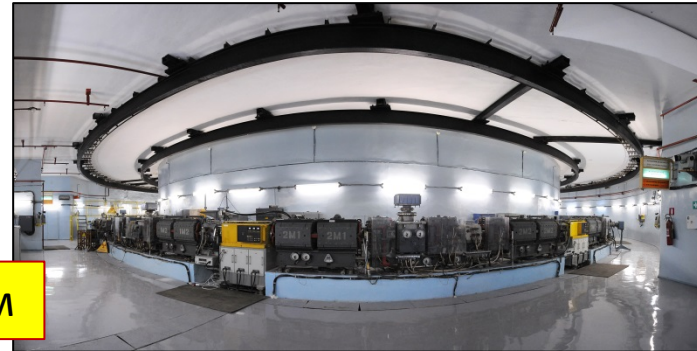


И.М. Капчинский
(1919-1993)

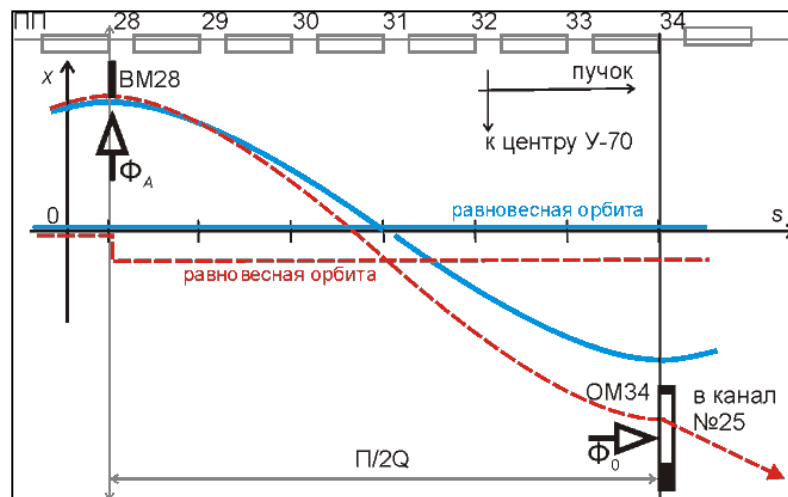


УРАЛ30 ↔ И100

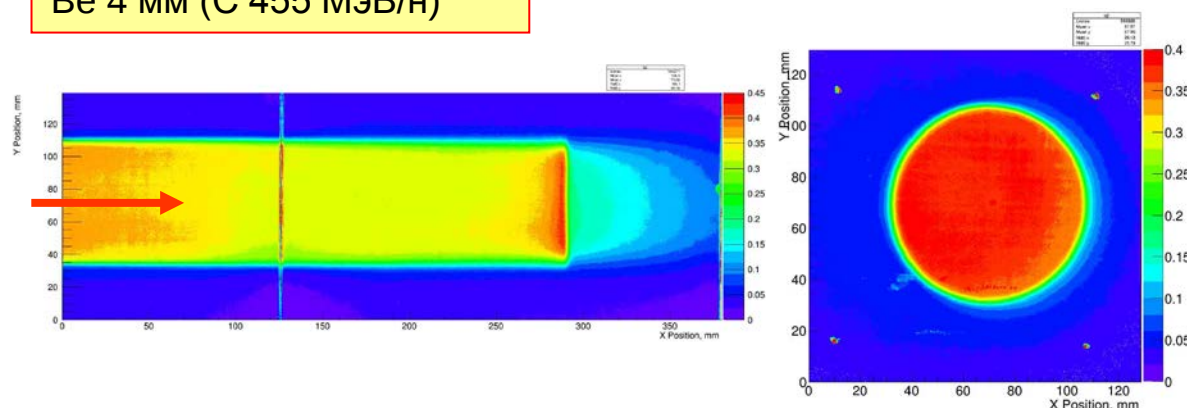
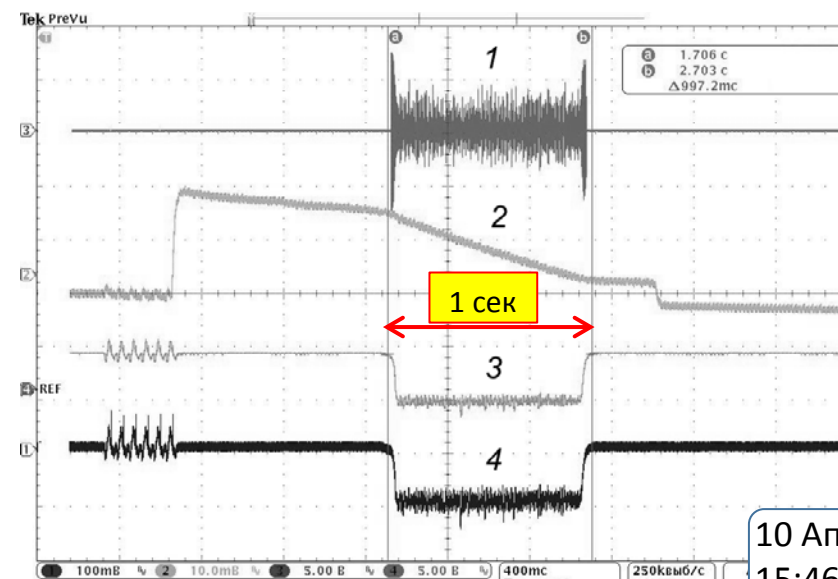




352 Гс, 1.32 ГэВ (p , тестовый пучок) 455 МэВ/нуклон (С). Замедление в [455-200] МэВ/нуклон (С)

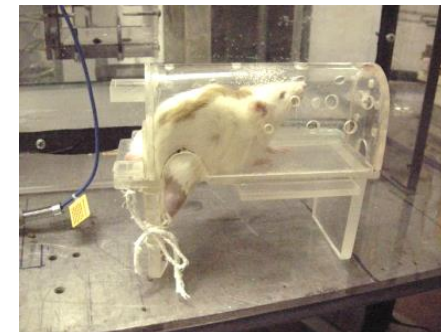
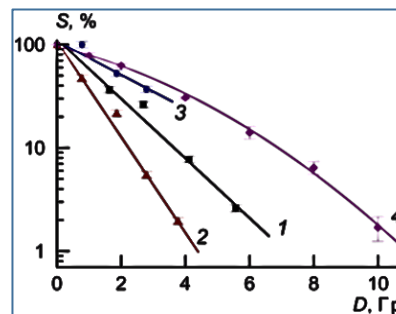


Графит 32 мм (p 1.32 ГэВ)
Ве 4 мм (С 455 МэВ/н)



Особенности МВ:

- Прямоугольные импульсы
- Малые пульсации (выбросы) плоской вершины
- Длительность вывода 0.6-1 сек
- Упрощение развёртки и управления доставленной дозой
- Допускает синхронизацию с дыханием пациента



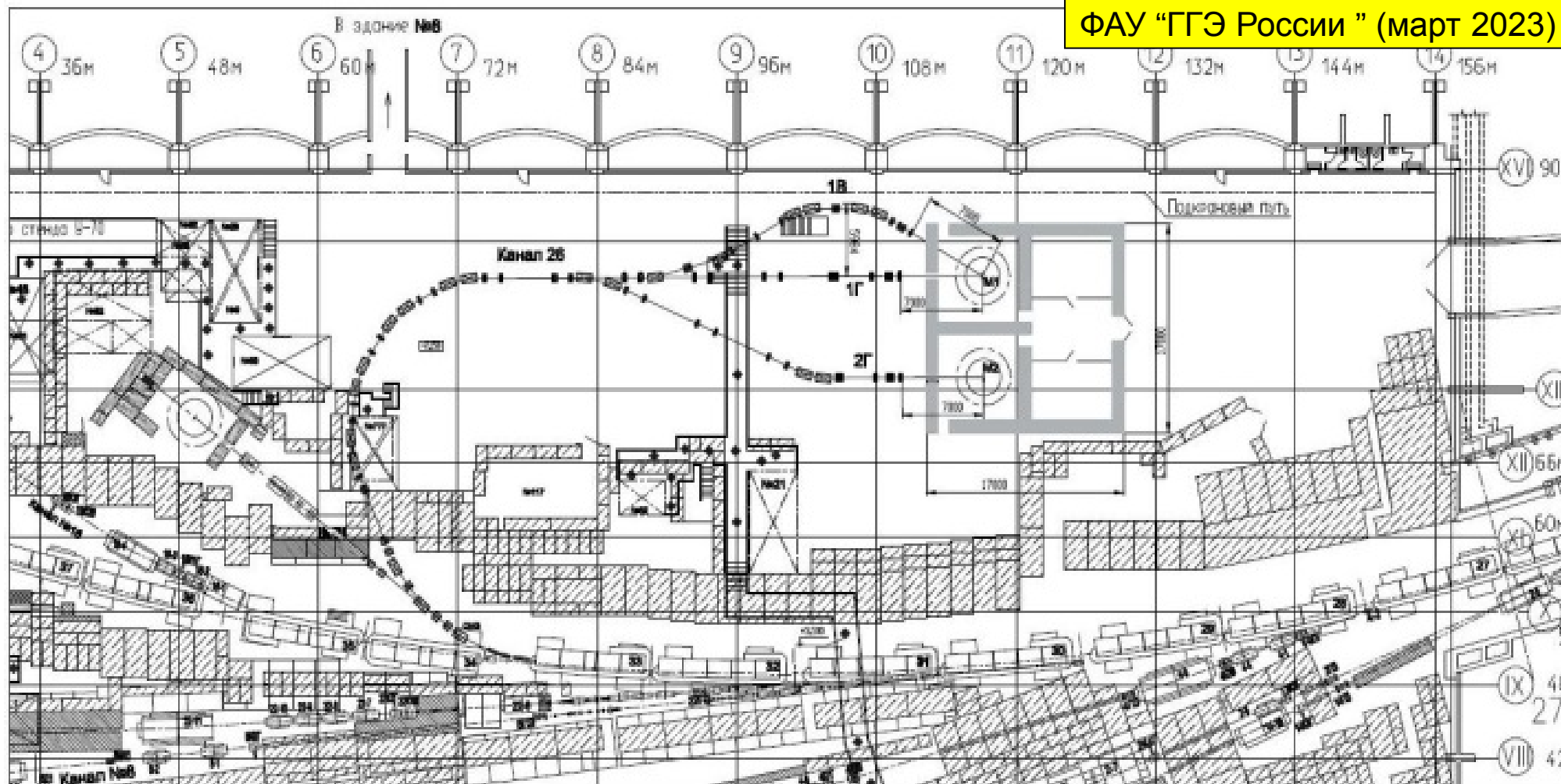
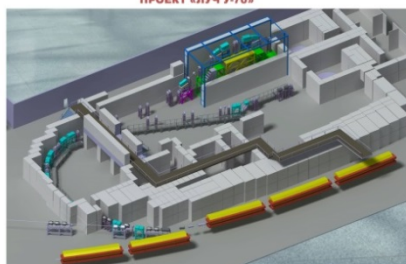
ПОТРЕБИТЕЛИ углеродного пучка :

1. **МРНЦ** им. А.Ф. Цыба (Обнинск) — филиал НМИРЦ Минздрава России
2. **ИТЭБ** (Пушино) РАН
3. ГНЦ **ФМБЦ** им. А.И. Бурназяна (Москва) ФМБА
4. ГНЦ **ИМБП** (Москва) РАН
5. **ОИЯИ** (Дубна), международная организация [ядерная физика]

3. ЛУЧ У-70: «Реконструкция здания 1БВ и здания 8 с целью создания экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на действующем Ускорительном комплексе У-70»



•положительное заключение
ФАУ «ГГЭ России » (март 2023)

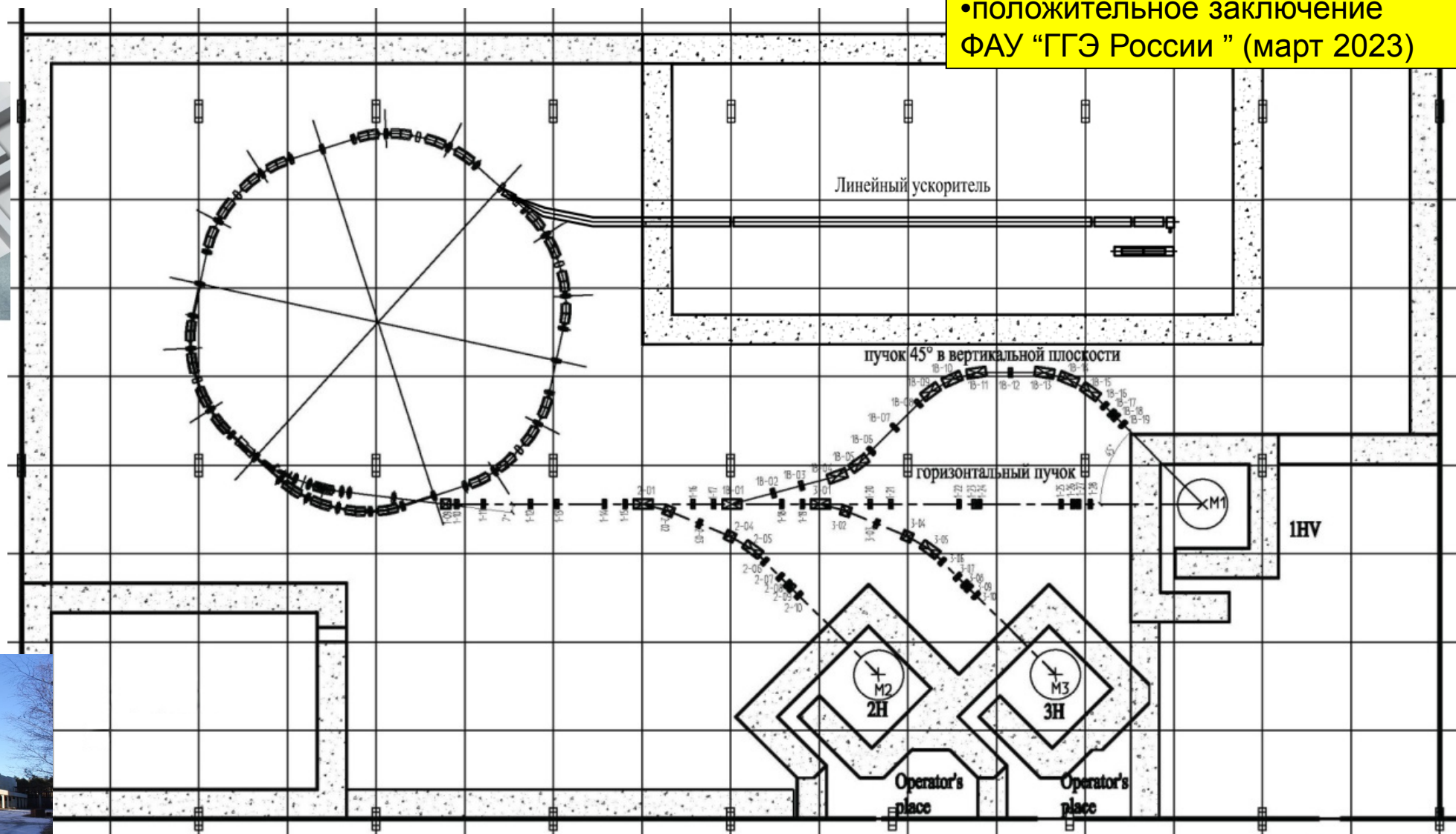
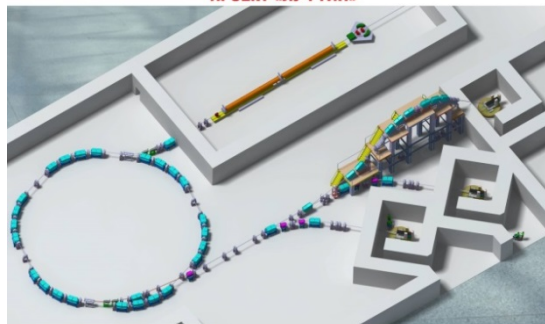


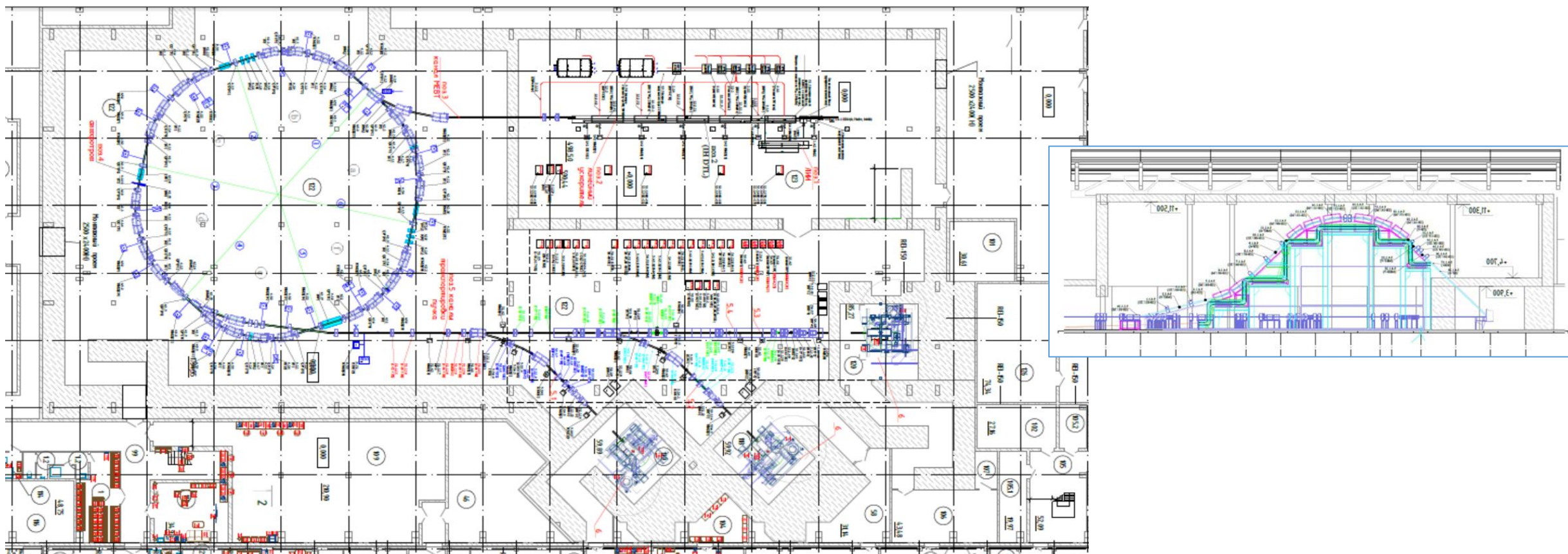
4. ЛУЧ ТИП: «Реконструкция здания 371 и строительство медицинского блока с целью создания прототипа типового отечественного клинического центра ионной углеродной терапии Луч-ТИП»



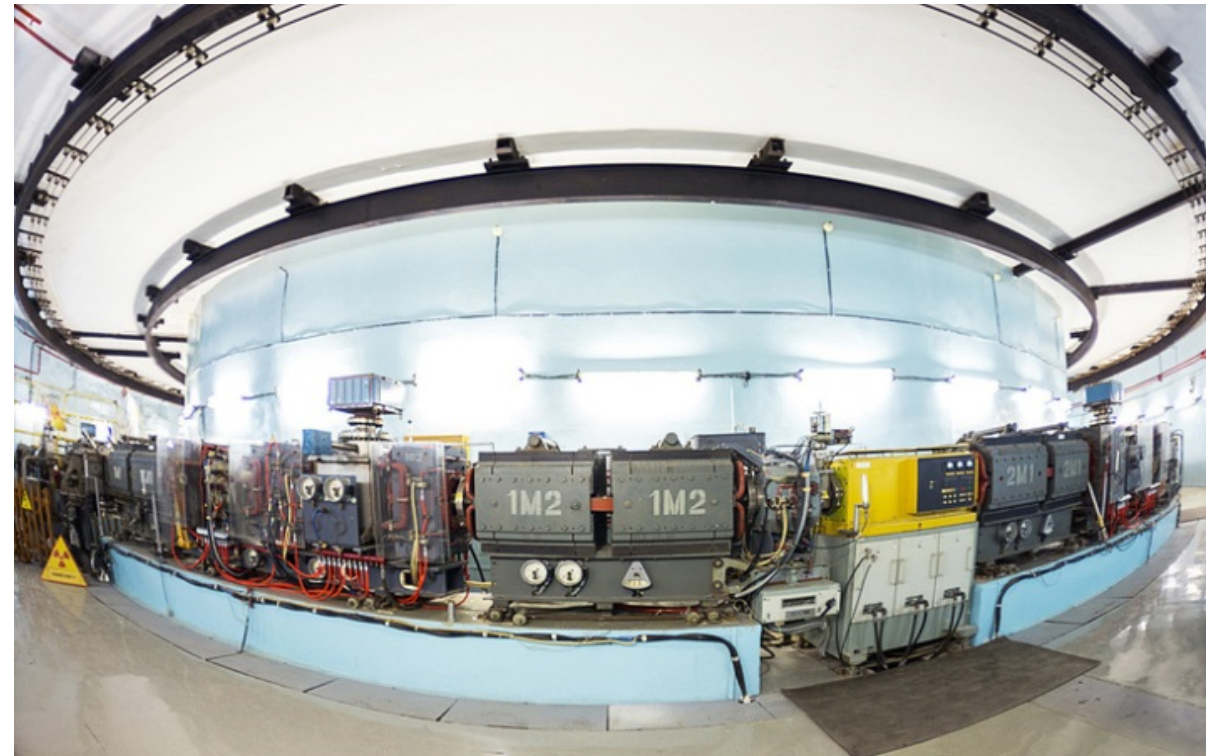
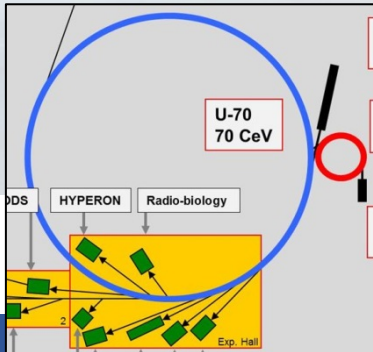
• положительное заключение
ФАУ «ГГЭ России» (март 2023)

ПРОЕКТ «ЛУЧ ТИП»



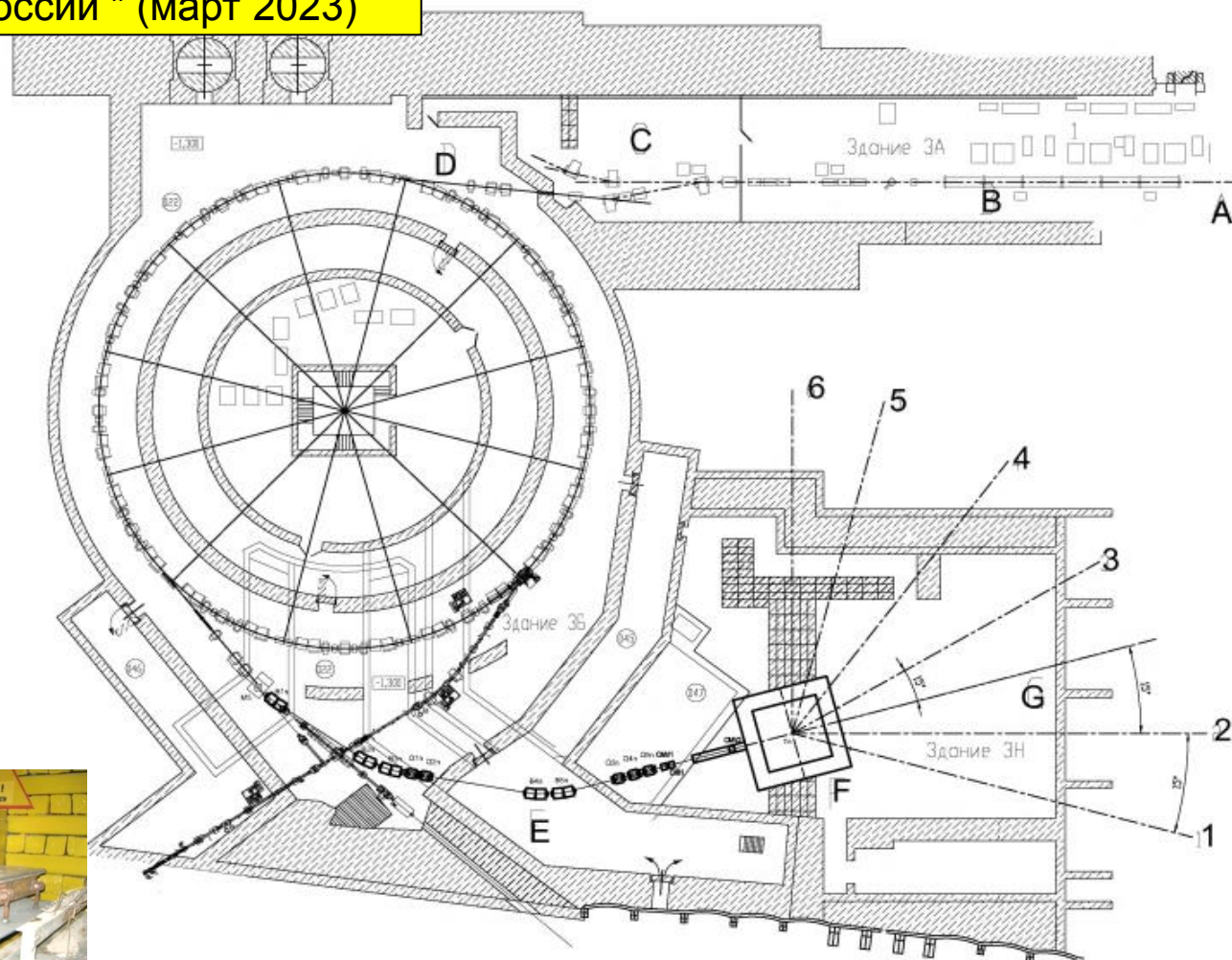


2. ОМЕГА: «Реконструкция здания Комплекс Бустер для размещения прототипа импульсного источника нейтронов на основе реакции испарительно-скалывающего типа» (2027 – 2030)

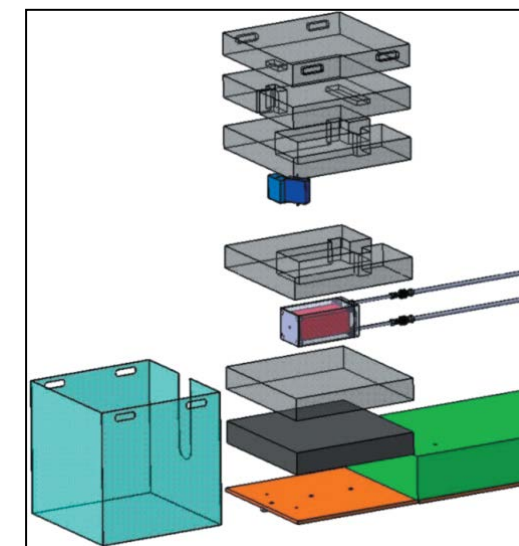
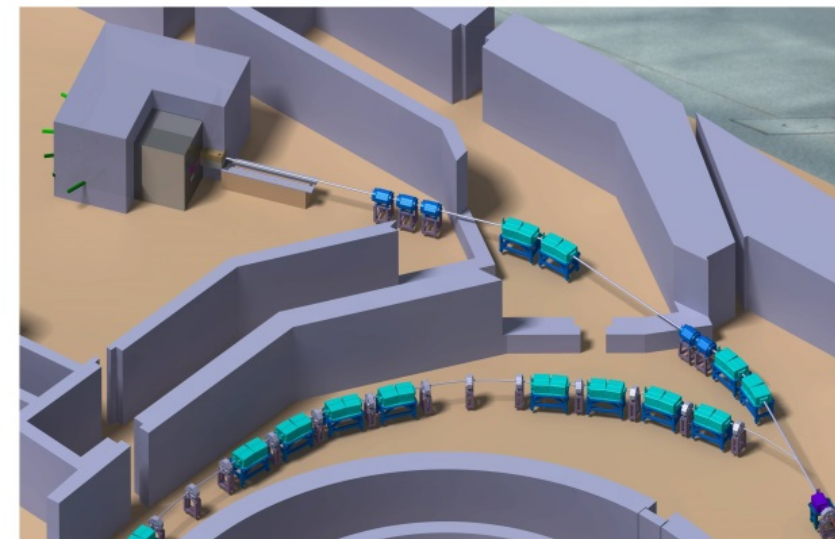


Общая технологическая схема установки «ОМЕГА»

- положительное заключение
ФАУ «ГГЭ России » (март 2023)



ПРОЕКТ «ОМЕГА»



5. ПРОИЗВОДСТВО: «Модернизация опытного производства ФГБУ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» [- ИФВЭ]



1	Эксплуатация. Длительные сеансы. Доступность пучка.
2	Первоочередные планово-профилактические и регламентные работы.
3	Мероприятия по программе модернизации УК У-70
4	Инвестиционные проекты на ТТП НИЦ КИ – ИФВЭ
5	Предложения по средне- и долгосрочному развитию