



НАЦИОНАЛЬНЫЙ  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ В ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

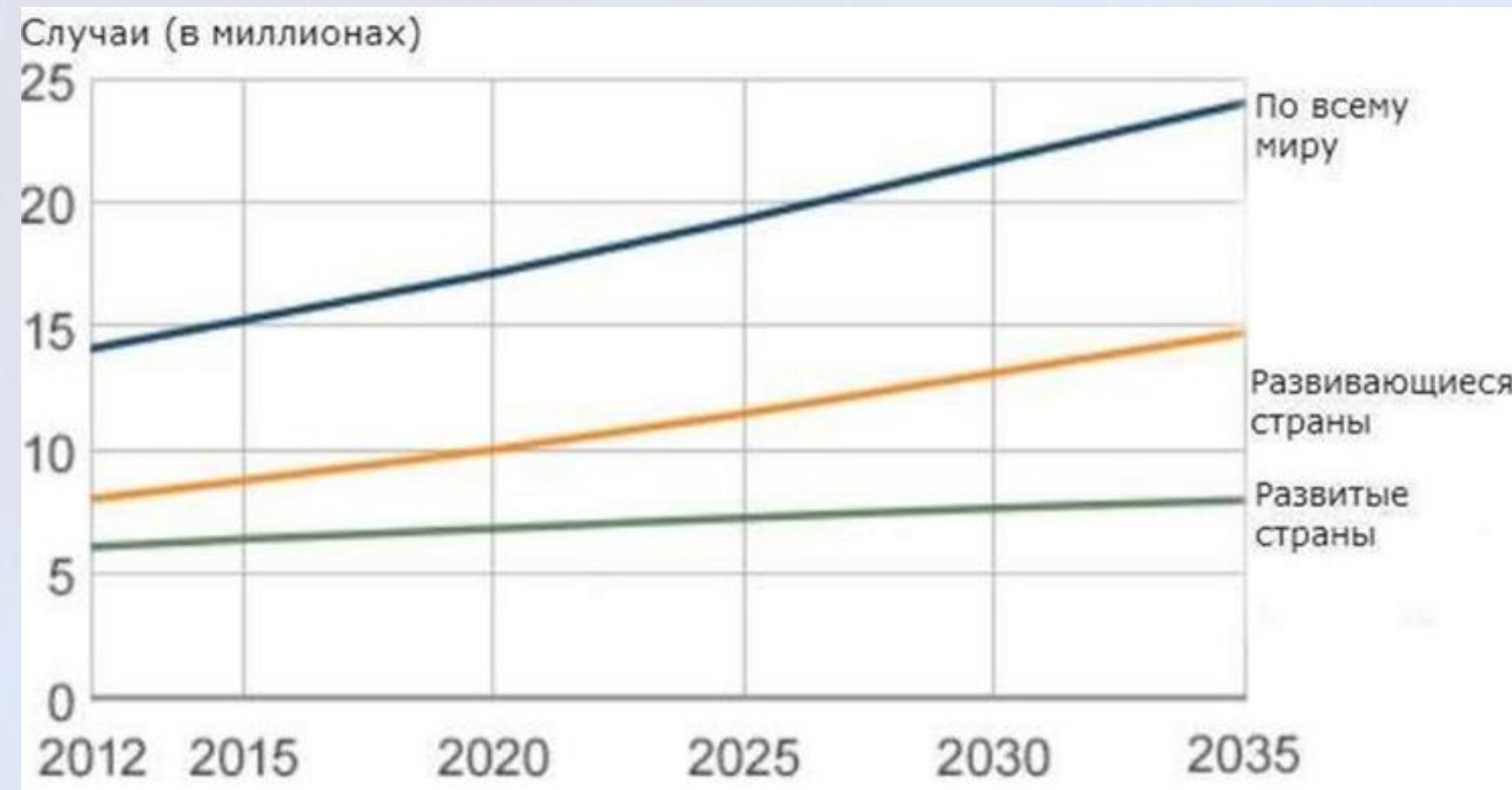
Отдел ядерной медицины КК НБИКС-пт

**Черных Алексей Николаевич, к.т.н., и.о. начальника отдела, с.н.с.**  
**E-mail: [Chernykh\\_AN@nrcki.ru](mailto:Chernykh_AN@nrcki.ru)**

Международный научный семинар  
«Перспективные направления развития энергетической безопасности ядерных и  
радиационных технологий»  
г. Минск, 20-22 мая 2025 г.

- История развития протонной лучевой терапии;
- Преимущества протонной лучевой терапии;
- Хронология развития протонной лучевой терапии;
- Протонная лучевая терапия в России;
- Создание комплекса протонной лучевой терапии в  
НИЦ «Курчатовский институт»

# ПРОГНОЗ ВСЕМИРНОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ УВЕЛИЧЕНИЯ ОНКОЛОГИЧЕСКИХ ЗАБОЛЕВАНИЙ В МИРЕ

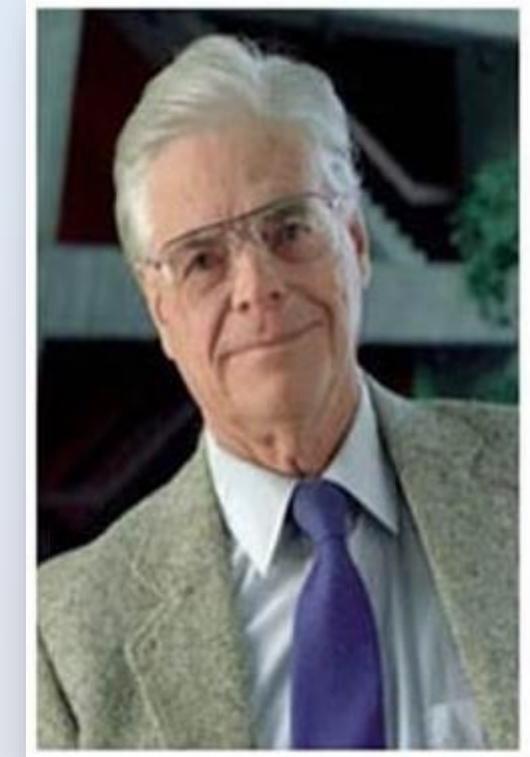


<https://cgbmyski.ru/rating/rejting-regionov-po-onkologiceskim-zabolevaniyam-2021.html> (по состоянию на октябрь 2024 г.)



**1946** – Р. Вильсон, декларация преимуществ протонного излучения

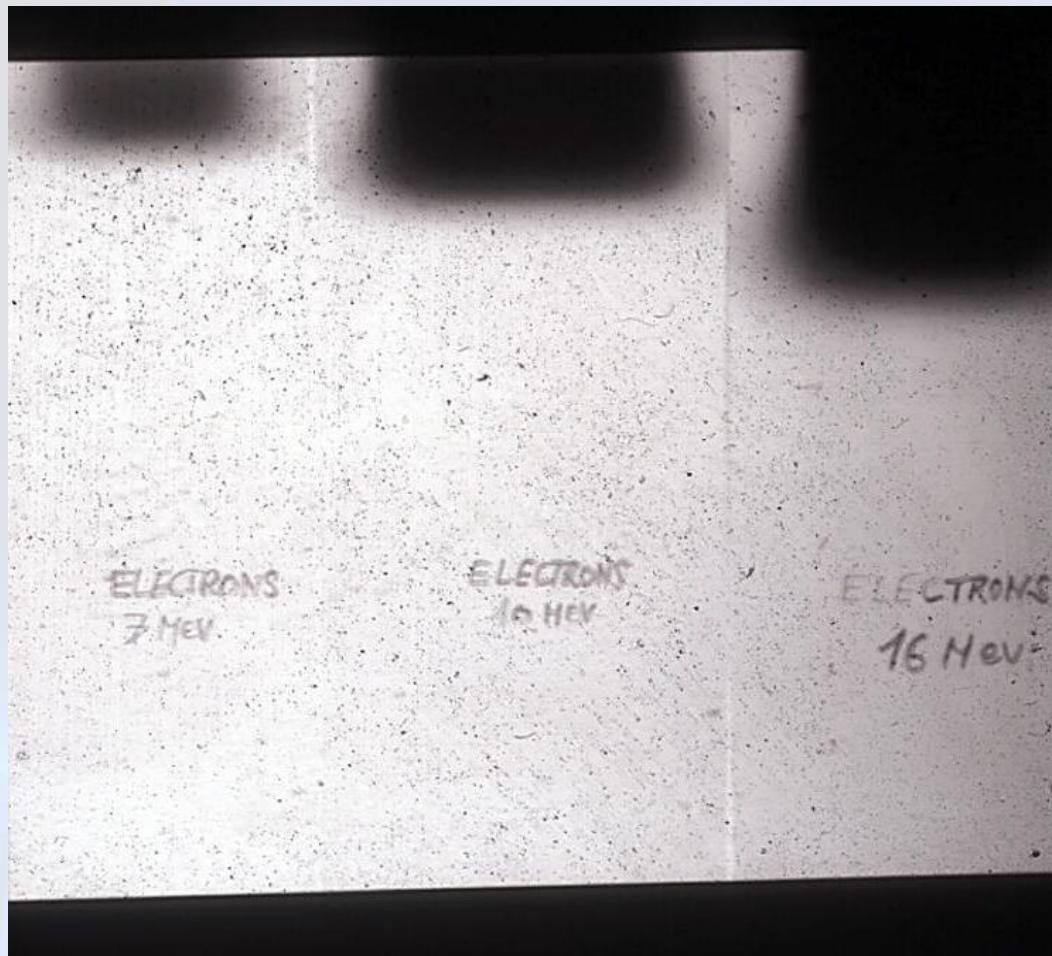
- Протоны можно использовать в клинической практике
- Доступны ускорители
- Максимальная доза облучения может быть доставлена в опухоль
- Протонная терапия обеспечивает сохранение здоровых тканей
- Модификаторы энергетического спектра могут расширять пик Брэгга



Robert Wilson

\*Wilson, R.R. (1946), “Radiological use of fast protons,” Radiology 47, 487.

Электроны



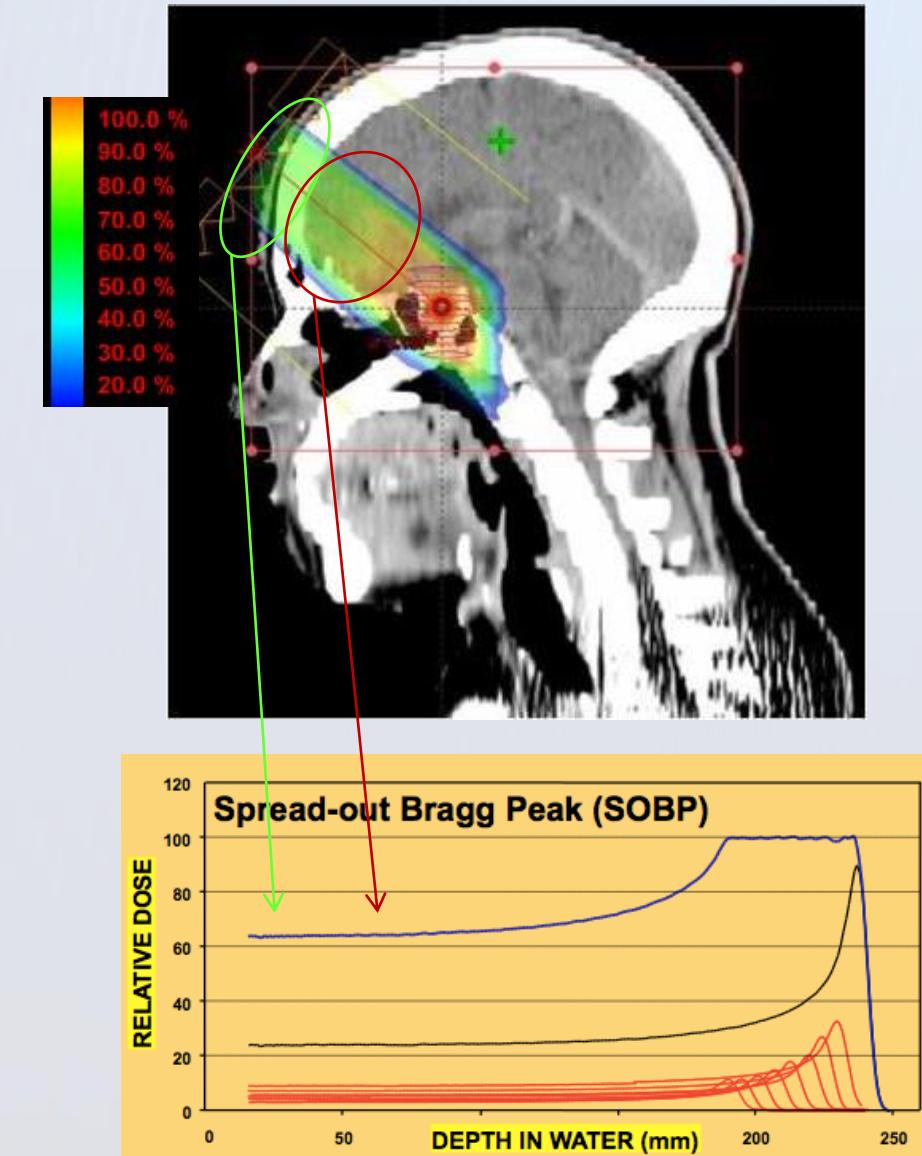
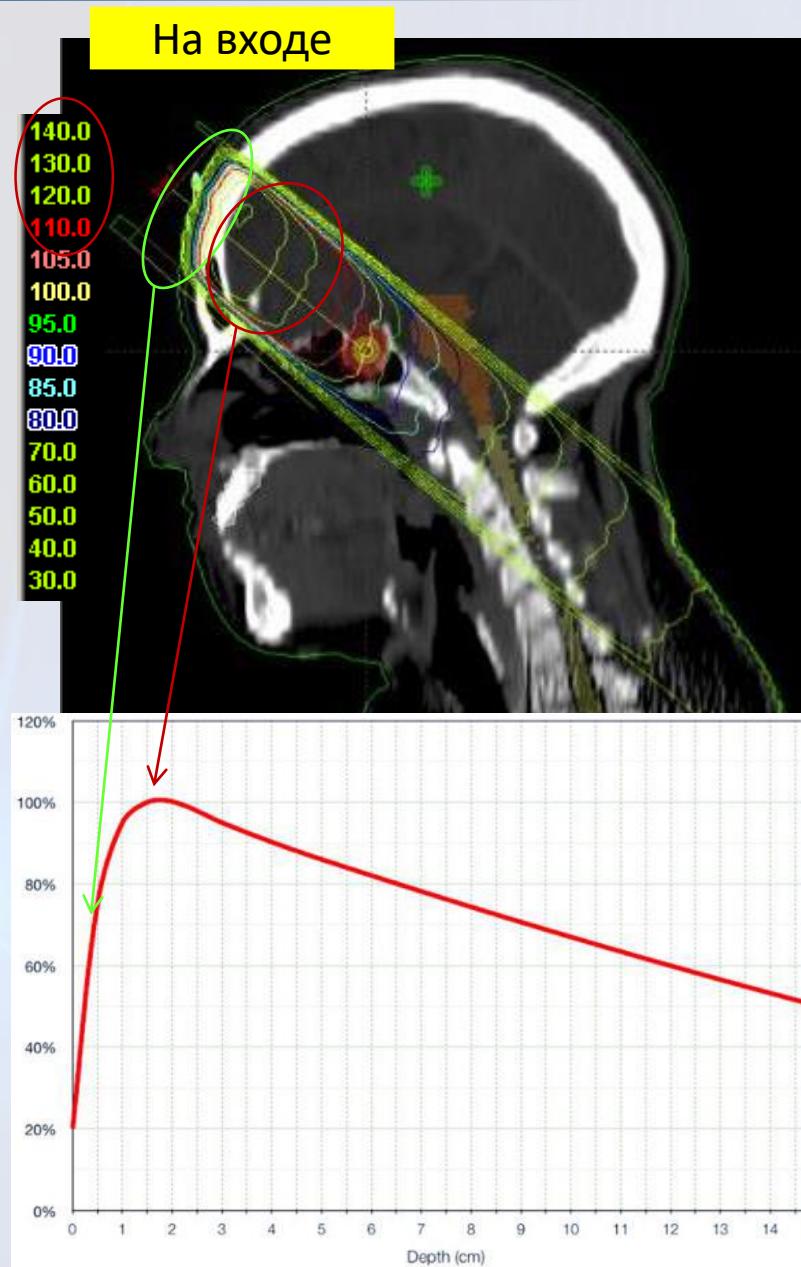
Протоны/ионы



20 см

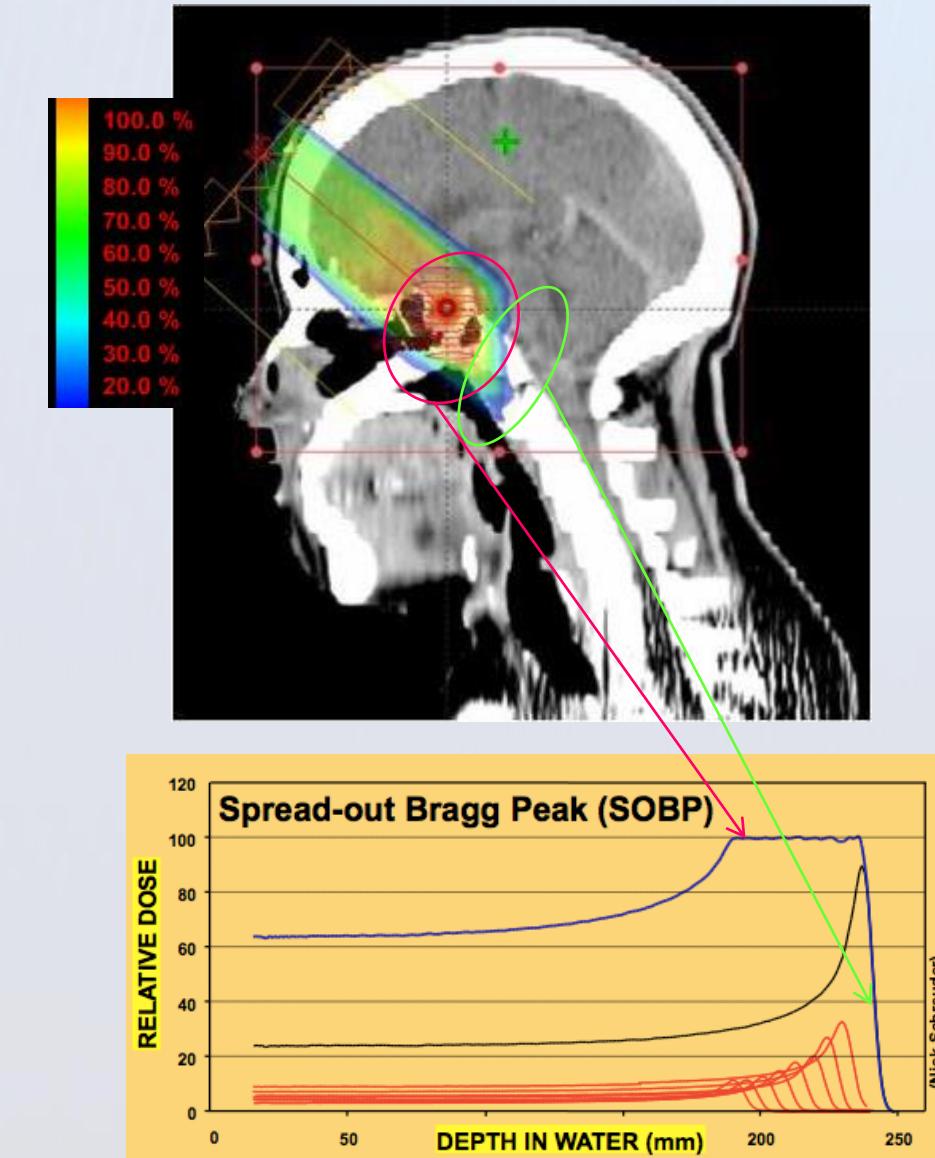
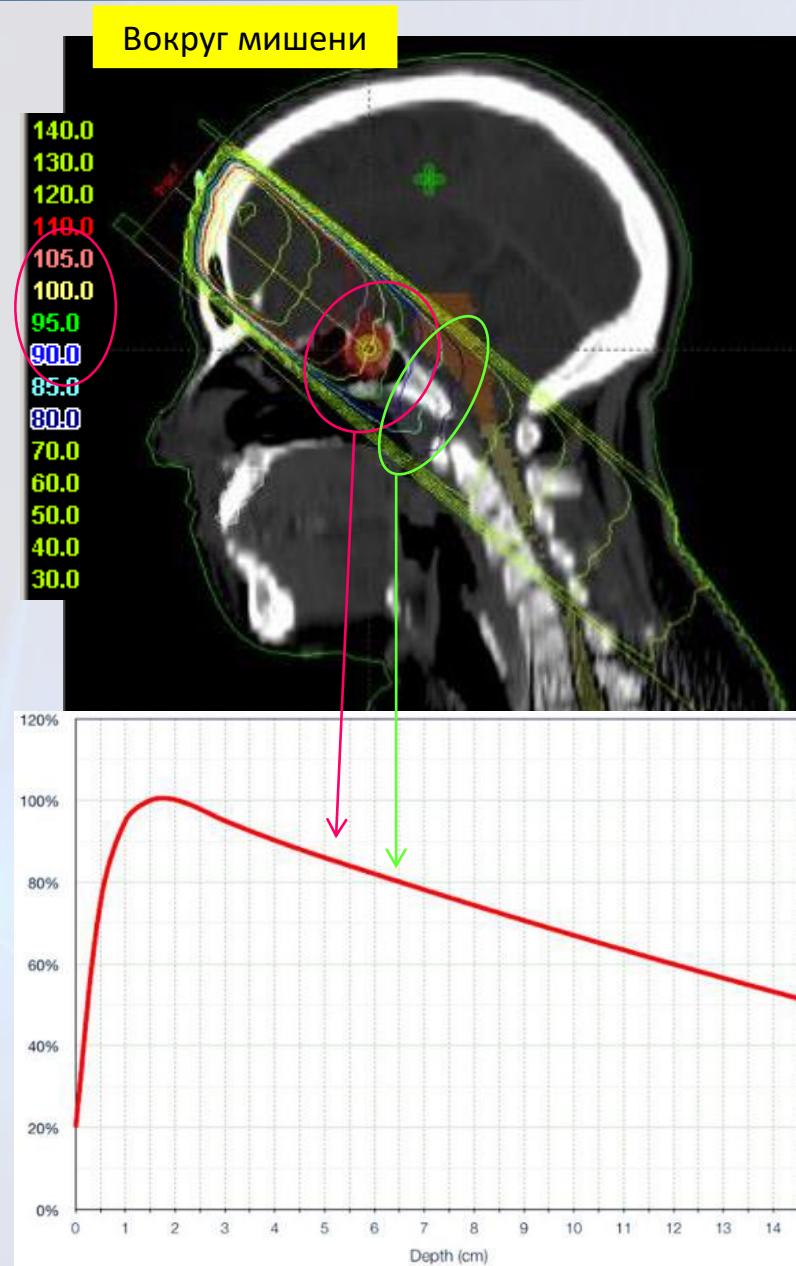
Фотоны



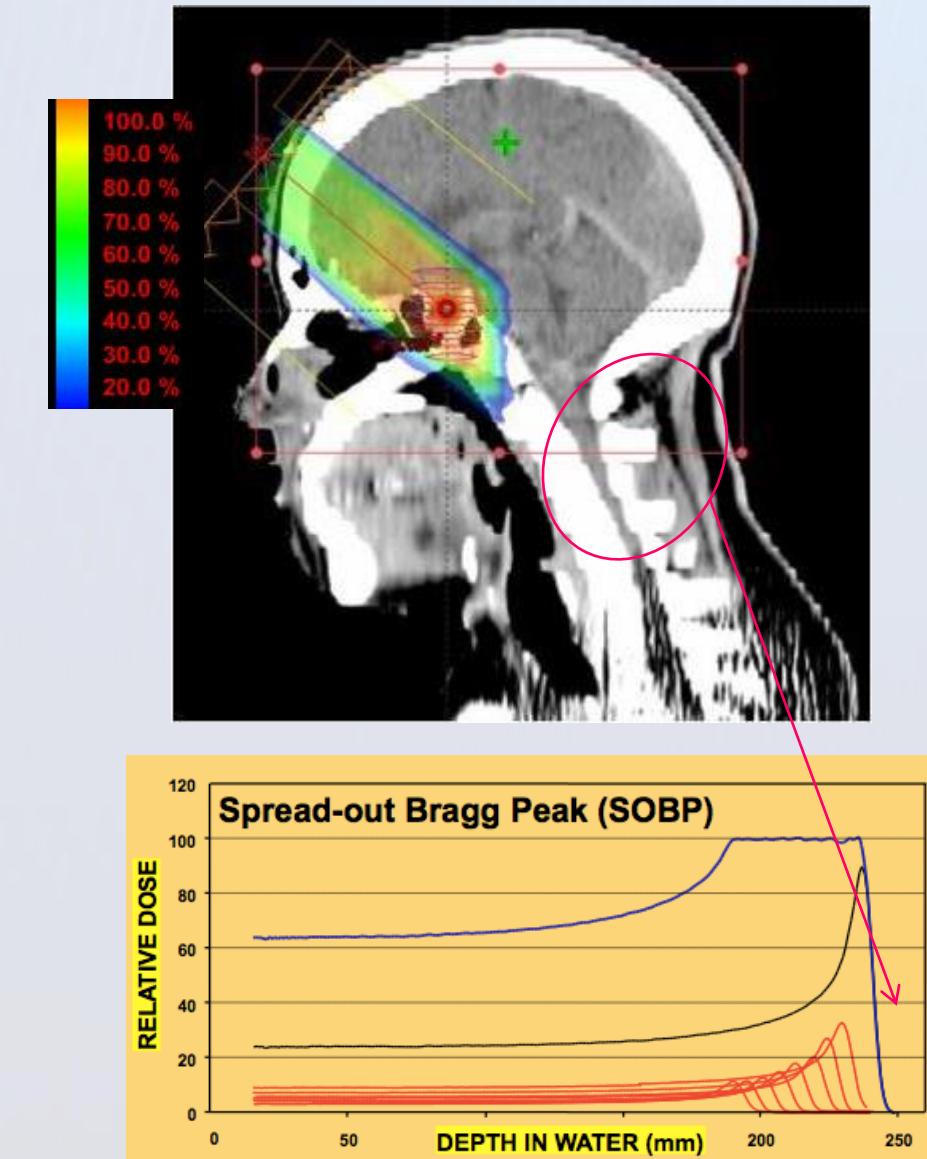


(Andy Kohler // graph : Niek Schreuder)

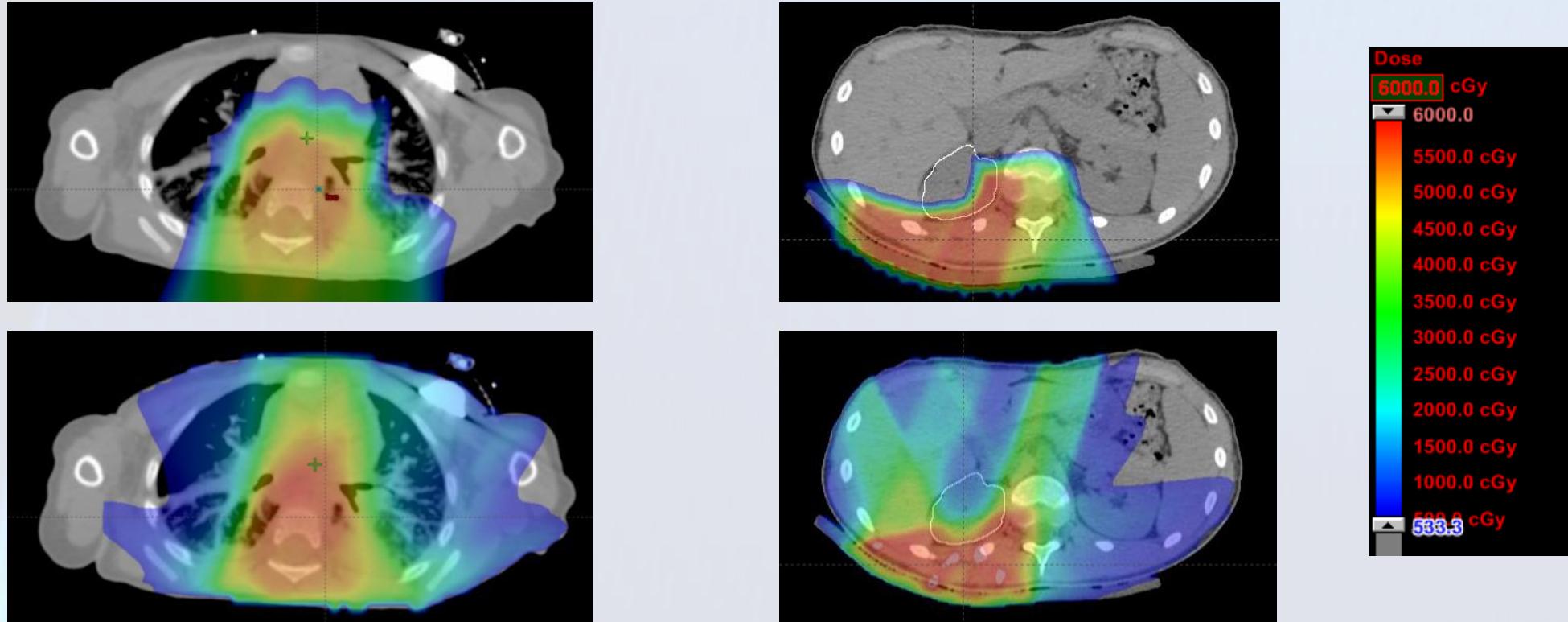
## **ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ**



(Andy Kohler // graph : Niek Schreuder)



Дозиметрическое сравнение протонной терапии и IMRT при саркome Юинга позвоночника и грудной клетки (Su Z, Indelicato DJ et al, ASTRO 2012)



В зависимости от области грудной клетки протонная терапия может минимизировать сердечную, легочную и почечную токсичность. У выживших в течение длительного времени может быть более низкий риск радиационно-индуцированных вторичных злокачественных новообразований, особенно рака молочной железы.

**1954** – первое облучение больного в Беркли (BLNL), опухоль гипофиза

**1954÷1990** – клинические исследования в физических институтах

**1958** – первое использование протонов в качестве нейрохирургического инструмента.

**1969** – первое облучение больного в НИЦ «Курчатовский институт»

**1974** – программа фракционированного облучения протонами больших полей в Гарвардской циклотронной лаборатории, Кембридж, Массачусетс.

**1990** – пуск первого Клинического центра протонной лучевой терапии в Медицинском университете г. Лома-Линда, США.

Экспоненциальный рост центров протонной терапии

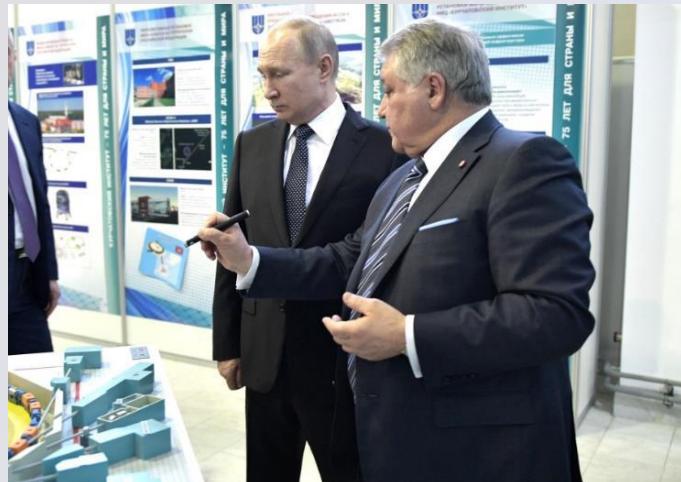


Сегодня в мире:

- Работают более **105** клинических центров ПЛТ (~**200** лучевых установок)
- ПЛТ получили более **300** тыс. пациентов
- Прогноз 2032г. – **1800** лучевых установок

- С 1968 по 1975 гг. и с 1986 по 2019 гг. ЛЯП ОИЯИ Экспериментальный центр протонной лучевой терапии, пролечено 1300 пациентов.
- С 1974 по 2013 гг. НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ Экспериментальный центр протонной лучевой терапии, пролечено 1352 пациента. С 2017 г. ведется модернизация и регистрация как медицинское изделие;
- С 1969 по 2012 гг. НИЦ «Курчатовский институт» - ККТЭФ Экспериментальный центр протонной лучевой терапии, пролечено 4368 пациентов;
- С 2018г. Работает многокабинный центр ПЛТ в г. Димитровграде (пр-во IBA, Бельгия);
- В октябре 2017г. введён в строй многокабинный центр ПЛТ в МИБС г. С.-Петербурге (пр-во Varian, США);
- С 2016г. в г. Обнинске работает однокабинная установка ПЛТ «Прометеус» облучение производится в положении сидя (пр-во Протом, Россия);





Обсуждение программы развития синхротронных и нейтронных исследований

Визит В.В. Путина в Курчатовский институт»



УКАЗ

ПРЕЗИДЕНТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

О мерах по развитию синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации

В целях комплексного решения задач ускоренного развития синхротронных и нейтронных исследований, необходимых для создания прорывных технологий, а также обеспечения создания и развития исследовательской инфраструктуры в Российской Федерации постановляю:

Указ Президента РФ о развитии синхротронных и нейтронных исследований (25.07.2019 №356)

- Создание сетевой инфраструктуры синхротронных и нейтронных исследований
- Создание новейшего отечественного научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины



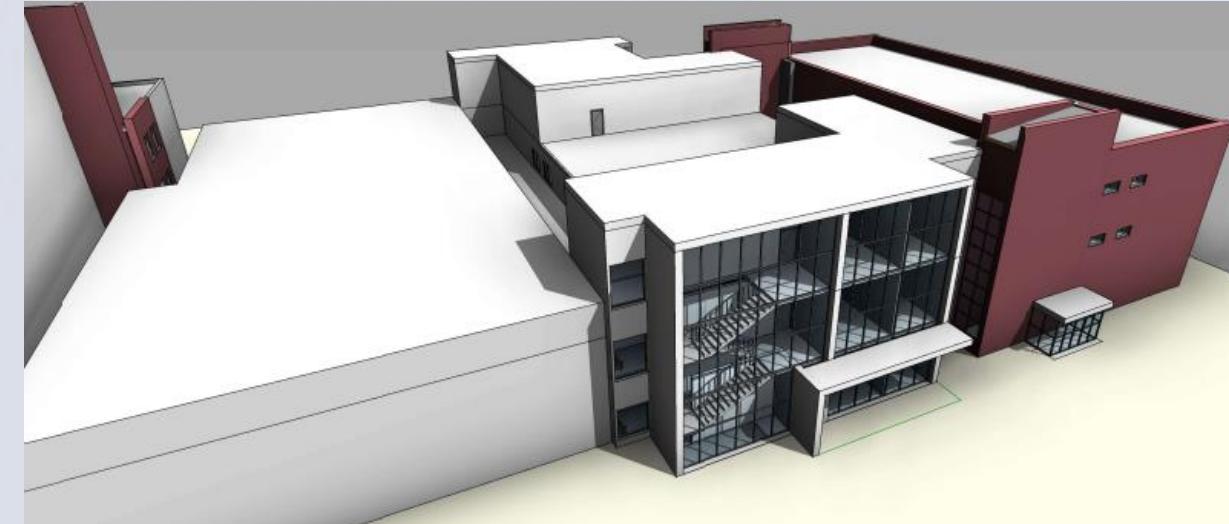
## Цель проекта:

- **создание и размещение комплекса протонной лучевой терапии**, позволяющего расширить парк современного отечественного терапевтического оборудования и отработать современные методы протонной лучевой терапии злокачественных новообразований в рамках клинической аprobации, с целью **внедрения отечественных технологий ПЛТ** в субъектах Российской Федерации и обеспечения **доступности высокотехнологичной медицинской помощи**.

## Стратегические задачи:

1. развитие **технологий создания протонных ускорителей** медицинского назначения
2. создание **типового оборудования для клинических** центров протонной лучевой терапии;
3. создание **необходимой инфраструктуры** для решения научно-исследовательских и практических задач:
  - разработка следующих поколений оборудования и технологий типового центра ПЛТ и испытания опытных образцов;
  - исследование методов повышения точности позиционирования пациента и зоны интереса;
  - развитие технологий дозноанатомического планирования и иммобилизации пациента и пр.;
4. обеспечение возможности **проведения клинической аprobации** современных технологий ПЛТ;
5. создание необходимых условий для **подготовки высококвалифицированных кадров**, как инженеров и медицинских физиков, так и медицинского персонала – специалистов по применению новых технических средств и методов в клинической практике

Получено положительное заключение ФАУ «Главгосэкспертиза России» от 21 декабря 2023 г. № 77-1-1-3-3444-23.



МИНИСТЕРСТВО СТРОИТЕЛЬСТВА И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АВТОНОМНОЕ ОРГАННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГЛАВГОСЭКСПЕРТИЗА ГОСУДАРСТВЕННОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ»  
ФГБУ «ГЛАВГОСЭКСПЕРТИЗА РОССИИ»

7 7 - 1 - 1 - 3 - 3 4 4 4 - 2 3

«УТВЕРЖДАЮ»

*А.М. Серебряков*  
Заместитель начальника Учреждения –  
руководитель Инженерного центра  
Серебряков Алексей Михайлович  
21 декабря 2023 г.

ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ ЗАКЛЮЧЕНИЕ  
ГОСУДАРСТВЕННОЙ ЭКСПЕРТИЗЫ

Проектная документация и результаты инженерных изысканий  
Реконструкция

«НПИ «Курчатовский институт», Реконструкция здания 145  
с целью размещения и создания комплекса протонной лучевой терапии,  
г. Москва»

Оценка соответствия результатов инженерных изысканий техническим  
рекламентам, отнесена соответствия проектной документации установленным  
требованиям, проверка достоверности определения сметной стоимости

Кодотказа: 09079-23УГП-43772  
Система документооборота ФАУ «Главгосэкспертиза России»  
соответствует требованиям БД УИС-2015

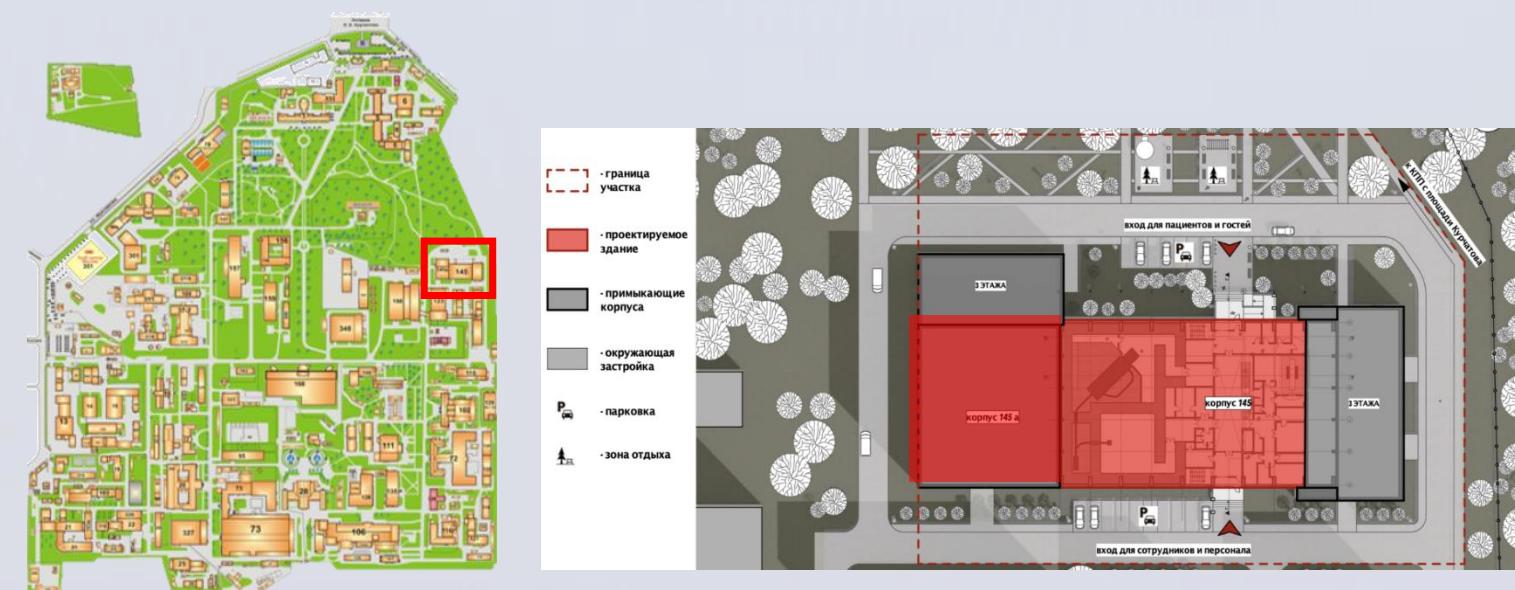
Положительное заключение

Архитектурно-планировочные решения

## ПАСПОРТ ОБЪЕКТА

Площадь объекта – 8 906,51 кв. м.,  
Комплекс ПЛТ – 7 288,78 кв.м.;

Ввод в эксплуатацию - 2028 год.



## Лучевая установка гантри

Энергия протонов 70—250 МэВ

Поворот пучка на  $\pm 185^\circ$

Дозовое распределение (ДР) — 20x20 см

Система активного формирования ДР

## Лучевая установка с горизонтальным фиксированным пучком

Энергия протонов 70—250 МэВ

Дозовое распределение (ДР) — 20x20 см

Активно/пассивная система формирования ДР

## Программно-аппаратный комплекс

интегрированный с автоматизированной системой управления  
технологическим процессом:

- медицинская информационная система
- радиологическая информационная система
- система хранения и обработки дозиметрических данных
- система дозноанатомического планирования

## Система позиционирования

2D и 3D система позиционирования

6D стол

Локализации: голова шея,  
абдоминальной области.

## Медицинский синхротрон с каналами транспортировки

Энергия протонов: 70-250 МэВ

Интенсивность:  $5 \times 10^{10}$  п/с

Размер пучка на выходе ( $\sigma$ ): ~ 5 мм

## Система позиционирования

2D система позиционирования,  
универсальный позиционер, положение сидя,  
лежа

Локализации: голова шея, глаза, предстательная  
железа

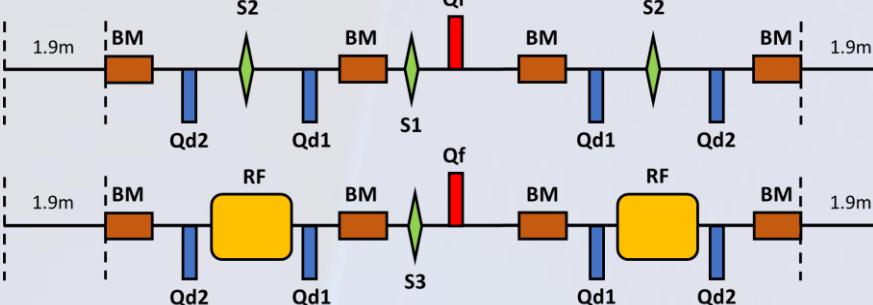
## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Энергия протонов: **70 - 250 МэВ**

Шаг изменения энергии: **0,4 МэВ**

Интенсивность: **5x10<sup>10</sup> протон/с**

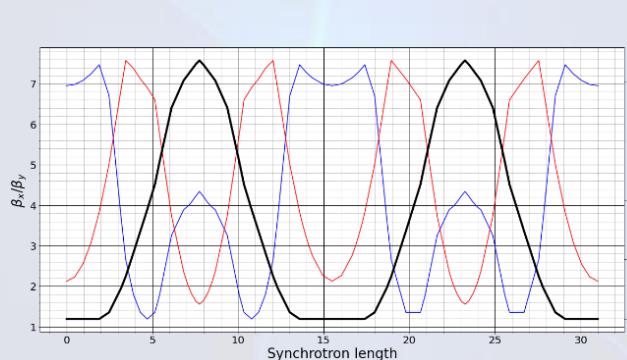
Время вывода: **до 1с**



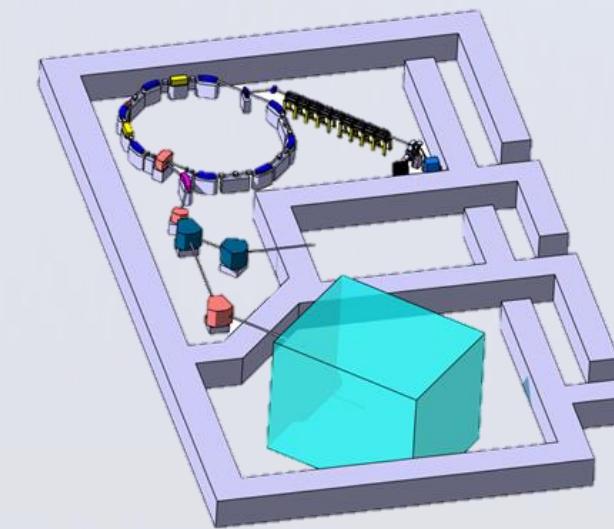
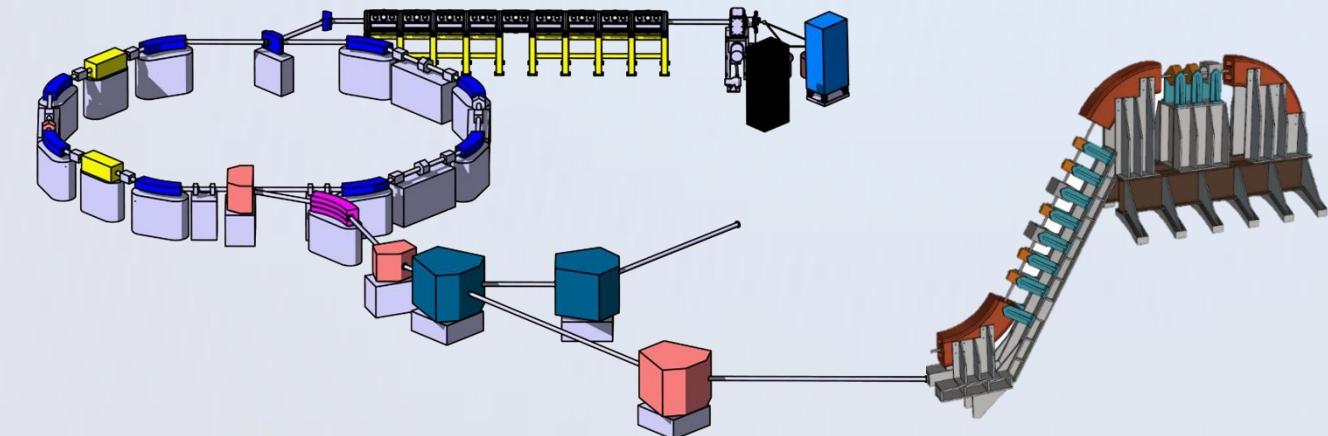
**2 суперпериода, поворот в диполях 45 градусов**

**8 диполей, 10 квадрупольей**

Прямолинейные промежутки с нулевой дисперсией



Ускоритель – протонный синхротрон с каналами вывода



Параметр	Значение
Периметр, м	31.0
Количество диполей	8
Количество квадрупольей	10
$I$ , частиц/имп.	$10^{11}$
Энергия инжекции, МэВ	5.0
$\beta_x^{max} / \beta_y^{max}$ , м	7.5/7.6
$D_x^{max}$ , м	4.4
$Q_x / Q_y$	1.66/1.4
Частота ВЧ генератора, МГц	1.0÷6.0

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Ускоряемые частицы: протоны

Энергия частиц на выходе: 5 МэВ

Импульсный ток: 1 – 25 мА

Частиц в импульсе:  $10^{11}$

Частота повторения: 0.5 Гц

Энергетический разброс: (10 – 20) кэВ

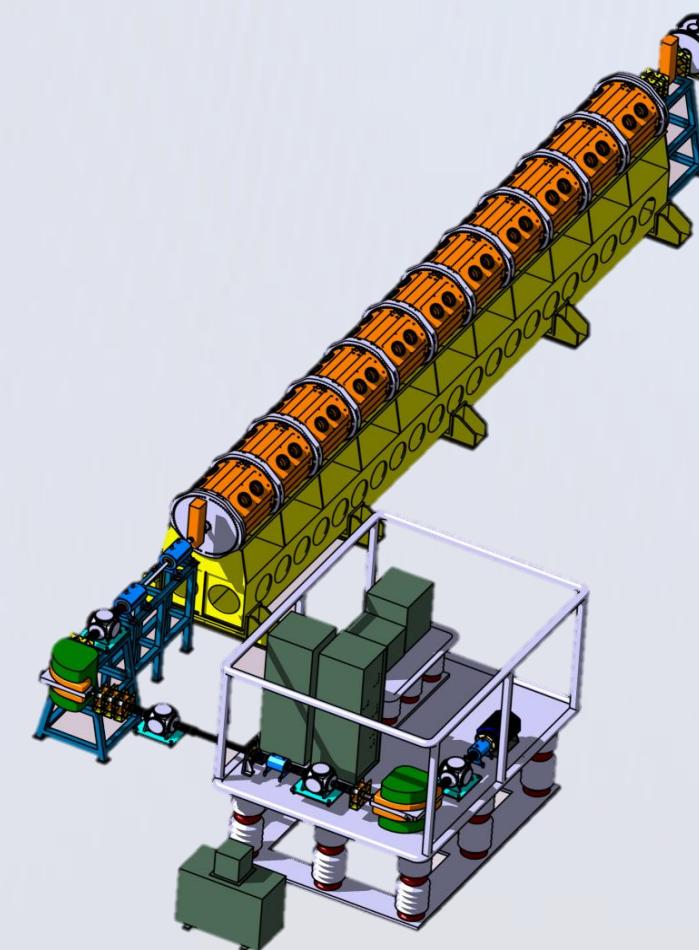
Длительность импульса тока: 1.2 мксек

Длина ускорителя: 7 метров

Темп ускорения: 0,7 МэВ/м

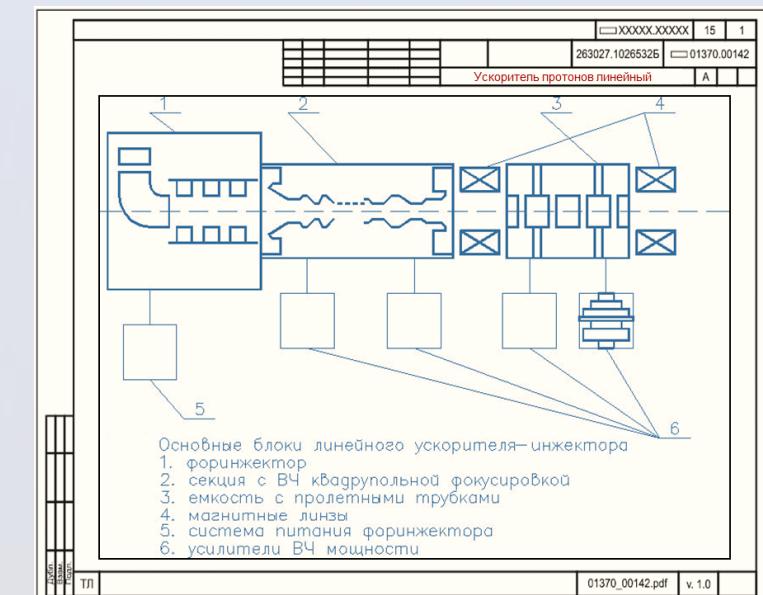


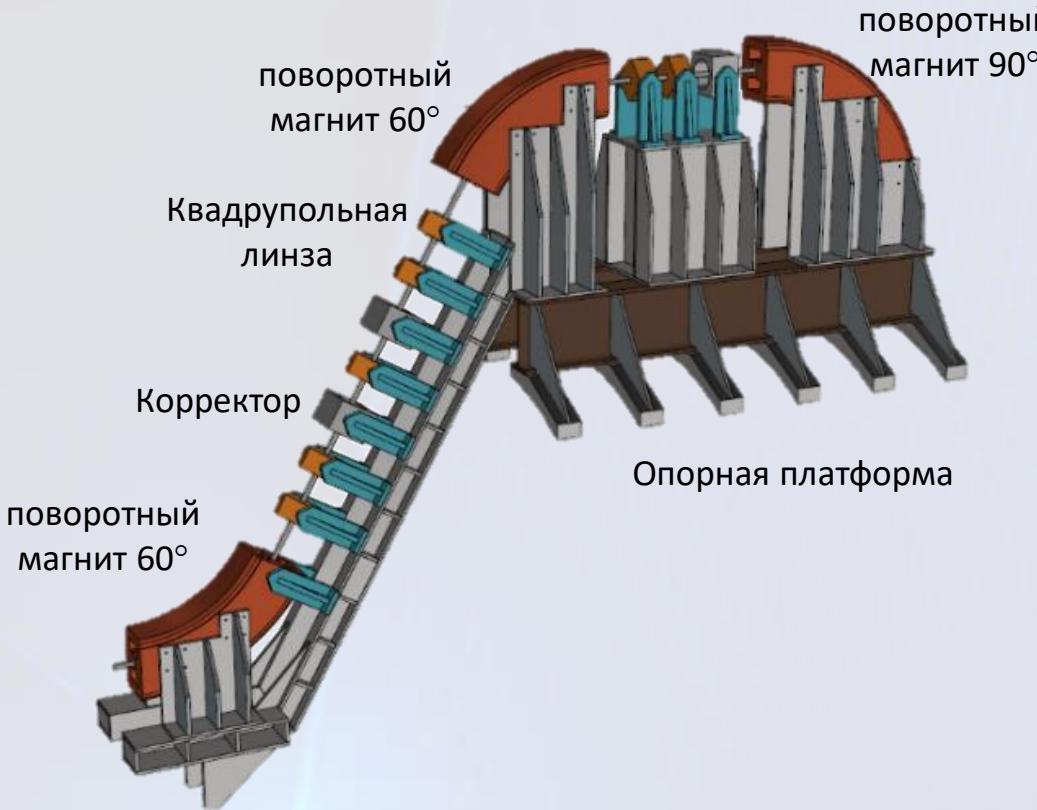
Аналог инжектора. Примерная длина 5 м.



## ИНЖЕКТОР – ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ

- Ионный источник протонов
- Канал согласования ионного источника
- Линейный ускоритель протонов (ЛУП)
- Канал транспортировки от ЛУП до синхротрона протонного пучка
- Система диагностики
- Система управления

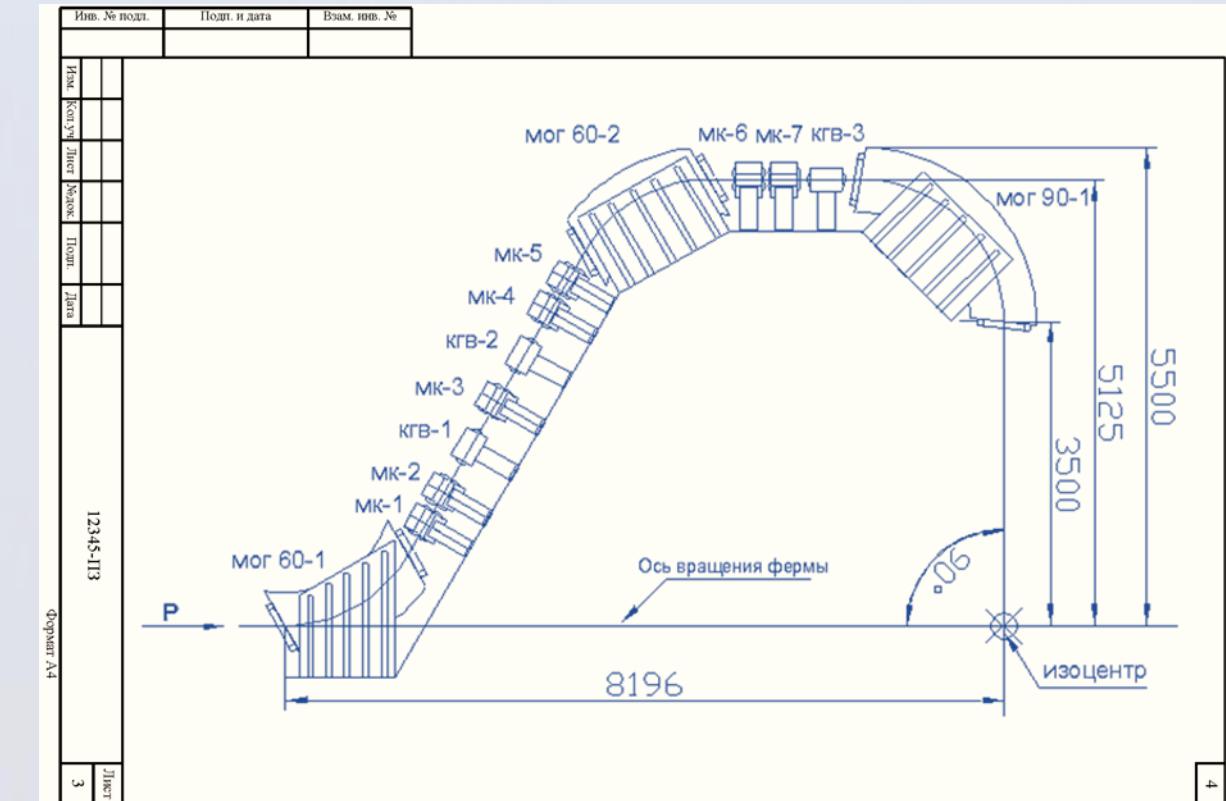




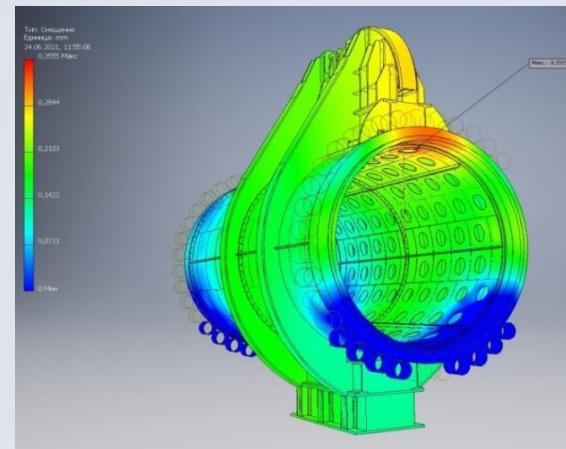
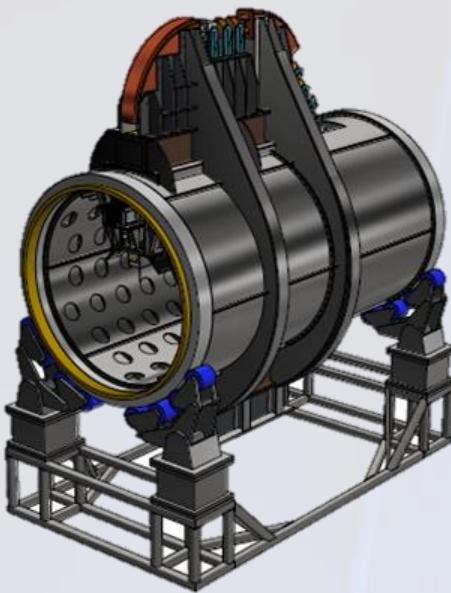
## Основные магнитооптические элементы:

- поворотный дипольный магнит на 60° - 2 шт.
- поворотный дипольный магнит на 90° - 1 шт.
- квадрупольные линзы – 7 шт.
- корректирующие магниты – 3 шт.

Параметр	Значение
Диапазон применяемых энергий	70 - 250 МэВ
Пучок на входе	Аксиально симметричный, дисперсия Dx, Dy = 0
Пучок на выходе	$\sigma_x, \sigma_y < 3 \text{ мм}, \sigma_x', \sigma_y' < 0,3 \text{ мрад}$
Виртуальный SAD	3,5 м

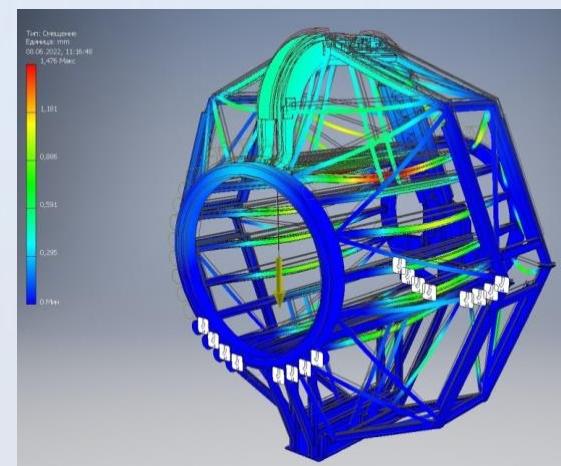
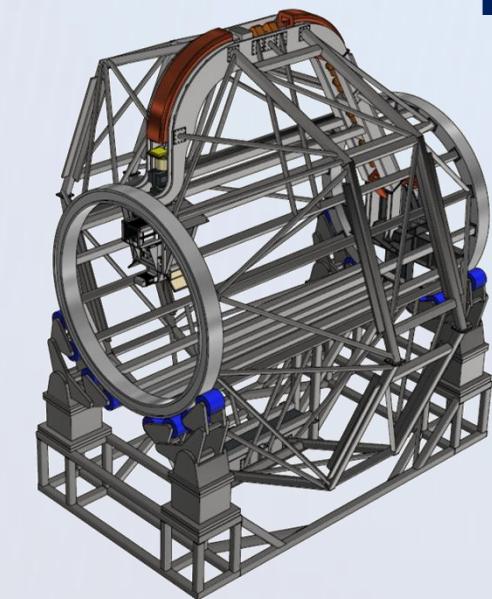


ТИП А



Расчёты жёсткости конструкции

ТИП Б



Расчёты жёсткости конструкции

Характеристики

Параметр	Значение
Внешний диаметр	10850 мм
Внутренний диаметр	4256 мм
Длина	10200 мм
Диапазон поворота	±185°
Масса	140 т

Аналоги



Mitsubishi



Toshiba

Характеристики

Параметр	Значение
Внешний диаметр	10850 мм
Внутренний диаметр	4256 мм
Длина	10200 мм
Диапазон поворота	±185°
Масса	90 т

Аналоги



IBA



LLUMC

Определена компоновка магнитооптической структуры канала транспортировки лучевой установки Гантри  
Выполнена оценка жесткости конструкций поворотной рамы Гантри.  
Подготовлено техническое задание

# ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА ГАНТРИ - СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА И СИСТЕМА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Энергия протонов **70-250 МэВ**

Поворот протонного пучка на **±185°**

Система **активного** формирования дозового распределения;

Область дозового распределения — **20x20 см**;

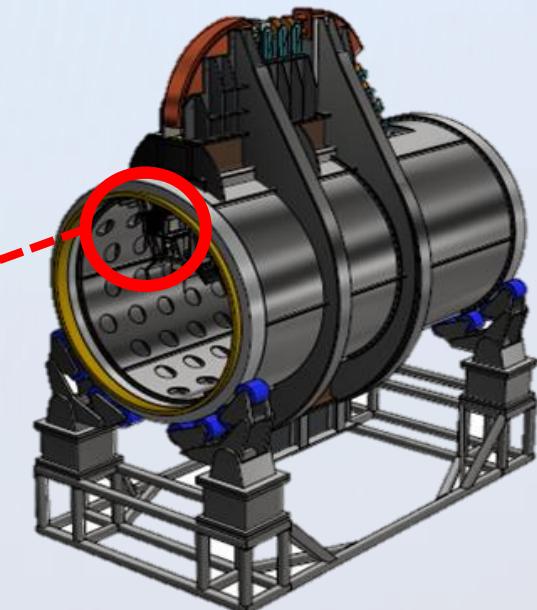
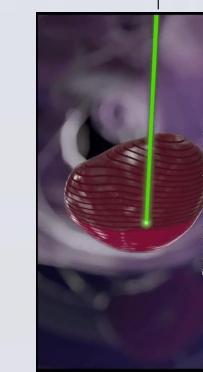
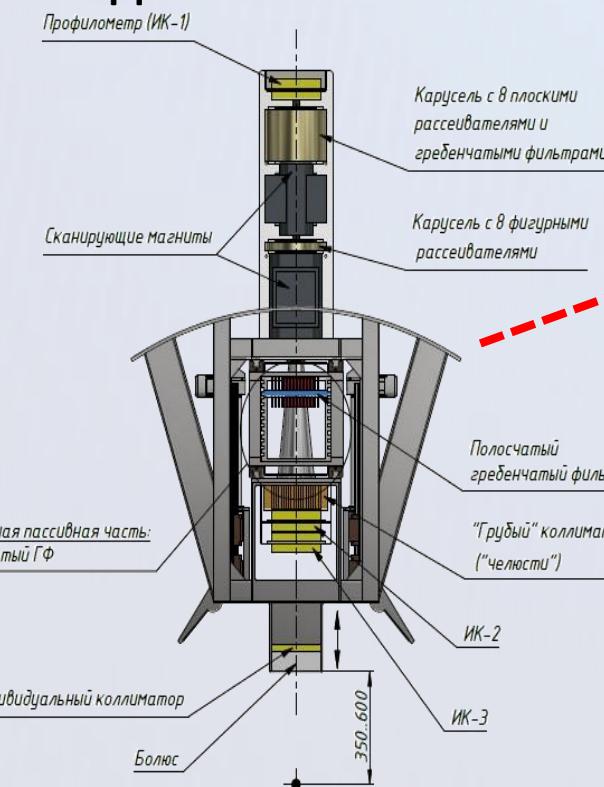


- 6D стол позиционер;
- 2D и 3D система рентгеновского позиционирования

## ЛОКАЛИЗАЦИИ:

- голова шея;
- новообразования абдоминальной области

## СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ДОЗОВОГО ПОЛЯ



Машинный зал гантри

ПОДГОТОВЛЕНЫ ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

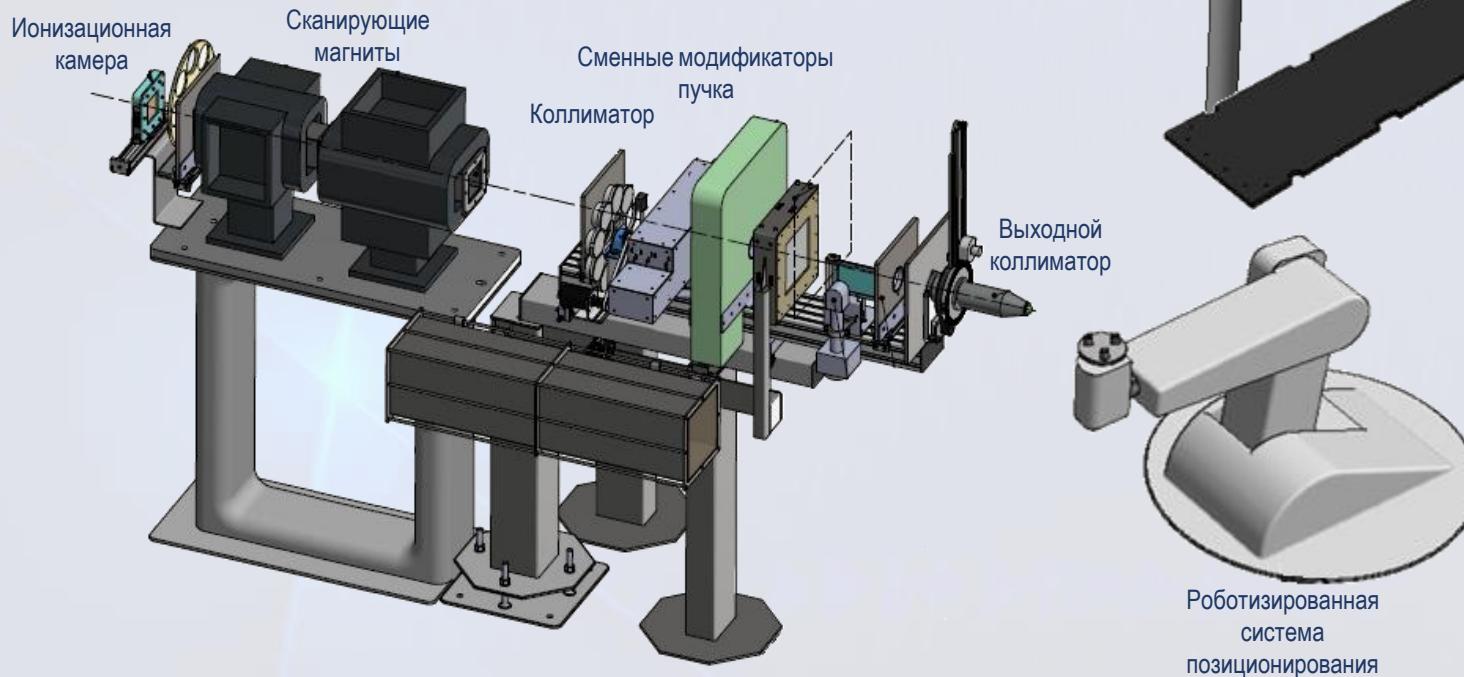
Энергия протонов 70–250 МэВ

### Активная система формирования дозового распределения:

- область дозового распределения — **40x40 см**
- технология формирования требуемого дозового распределения – «воксельное» сканирование.

### Пассивная система формирования дозового распределения:

- Область дозового распределения — **Ø 50 мм**

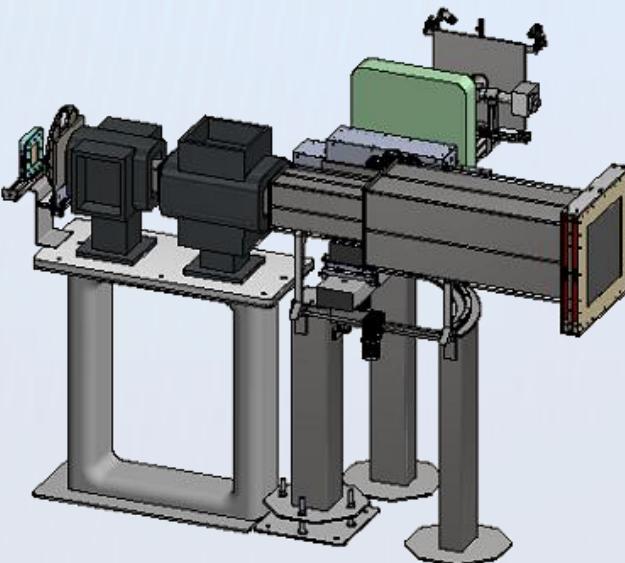


### Параметры пучка в изоцентре установки:

- размер пучка в  $\sigma$  не более **3 мм**, при энергии пучка 250 МэВ и не более **8 мм**, при энергии пучка 70 МэВ (значения для промежуточных величин энергии экстраполируются);
- сечение пучка имеет: круглую симметричную форму

2D система рентгеновского позиционирования

Универсальный позиционер

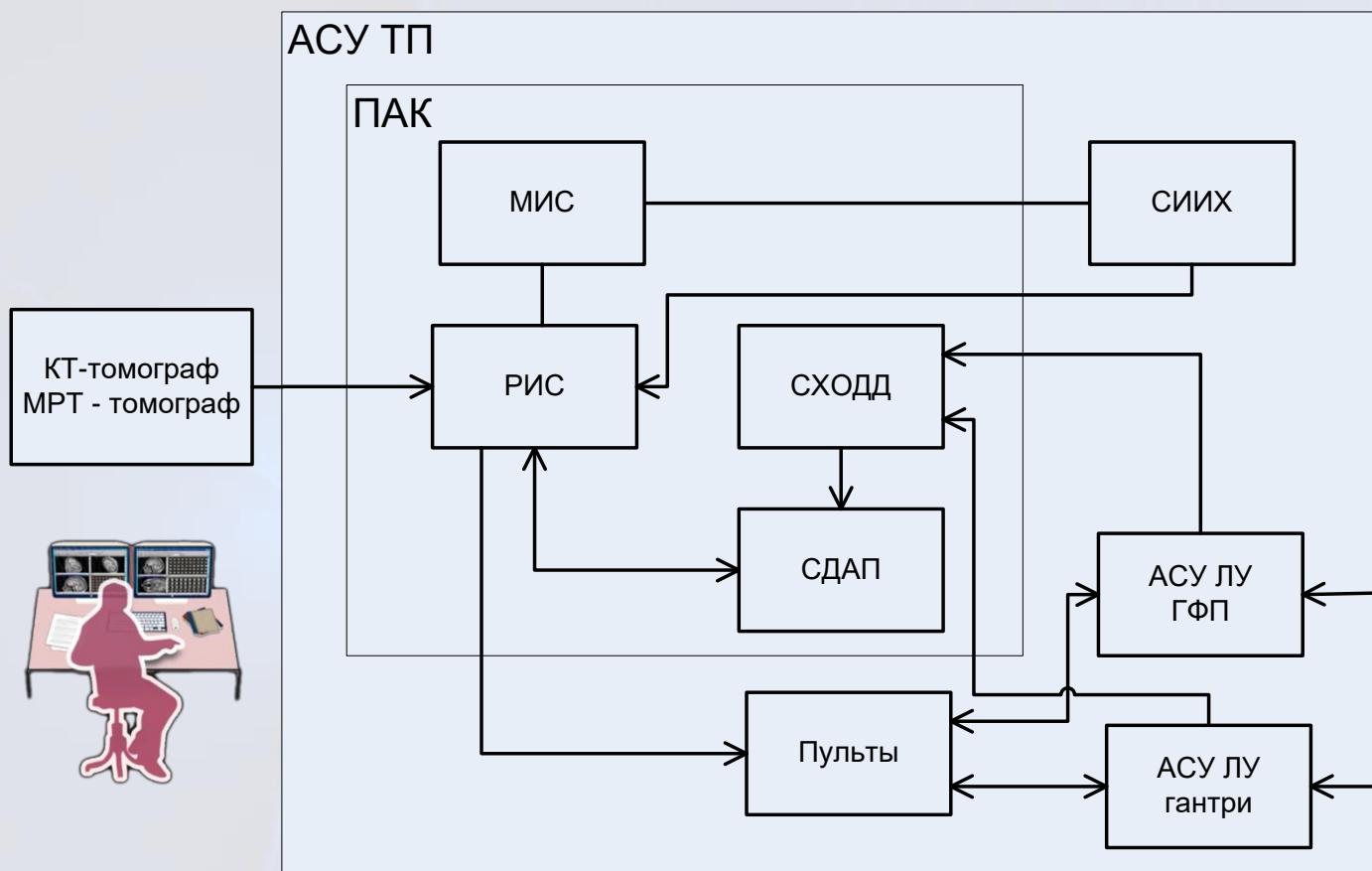
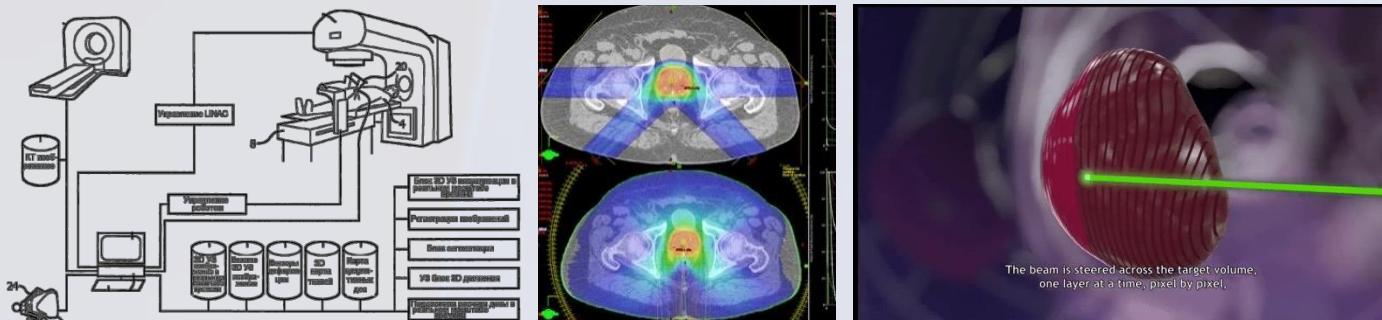


Система формирования дозового распределения для двух режимов работы

## ЛОКАЛИЗАЦИИ:

- внутриглазные новообразования;
- новообразований орбиты глаза;
- голова, шея.
- предстательная железа.

ЗАКЛЮЧЕН КОНТРАКТ НА ПОСТАВКУ  
ОБОРУДОВАНИЯ



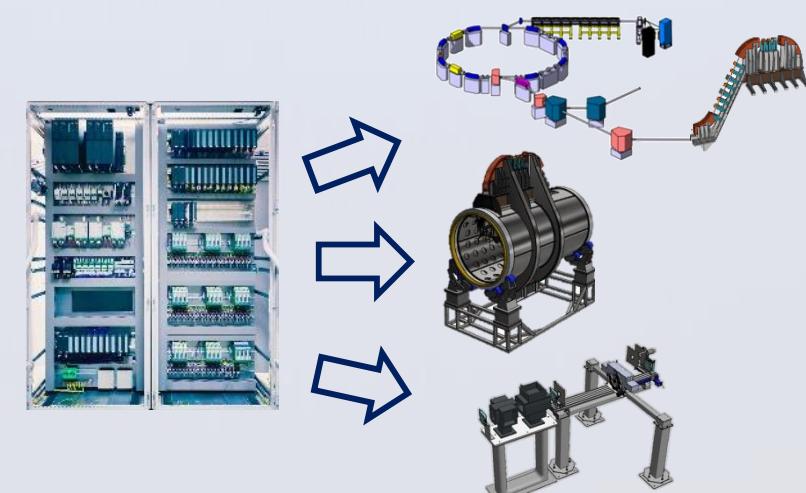
## ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС (ПАК):

Медицинская информационная система (МИС)

Радиологическая информационная система (РИС)

Система дозно-анатомического планирования (СДАП)

Система хранения и обработки дозиметрических данных (СХОДД)



ЗАКЛЮЧЕН КОНТРАКТ НА ПОСТАВКУ  
ОБОРУДОВАНИЯ

**Срок реализации (ввод в эксплуатацию) проекта Луч-Протон – 2028 г.**

**Клинические испытания и регистрация в качестве медицинского изделия – 2029 г.**

**На основании статистических данных в России и Беларуси выявляется ежегодно более 550 тыс. онкологических пациентов.**

**Решение в рамках реализации проекта Луч-Протон задачи создания типового оборудования для клинических центров протонной лучевой терапии и последующее его тиражирование в рамках союзного государства позволит в значительной степени удовлетворить потребности Беларуси в этом эффективном и высокотехнологичном виде лечения онкологических пациентов.**

Поздравляем белорусских коллег с 60-летием  
ГНУ "ОИЭЯИ-Сосны" НАН Беларуси!

**Спасибо за внимание!**