



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

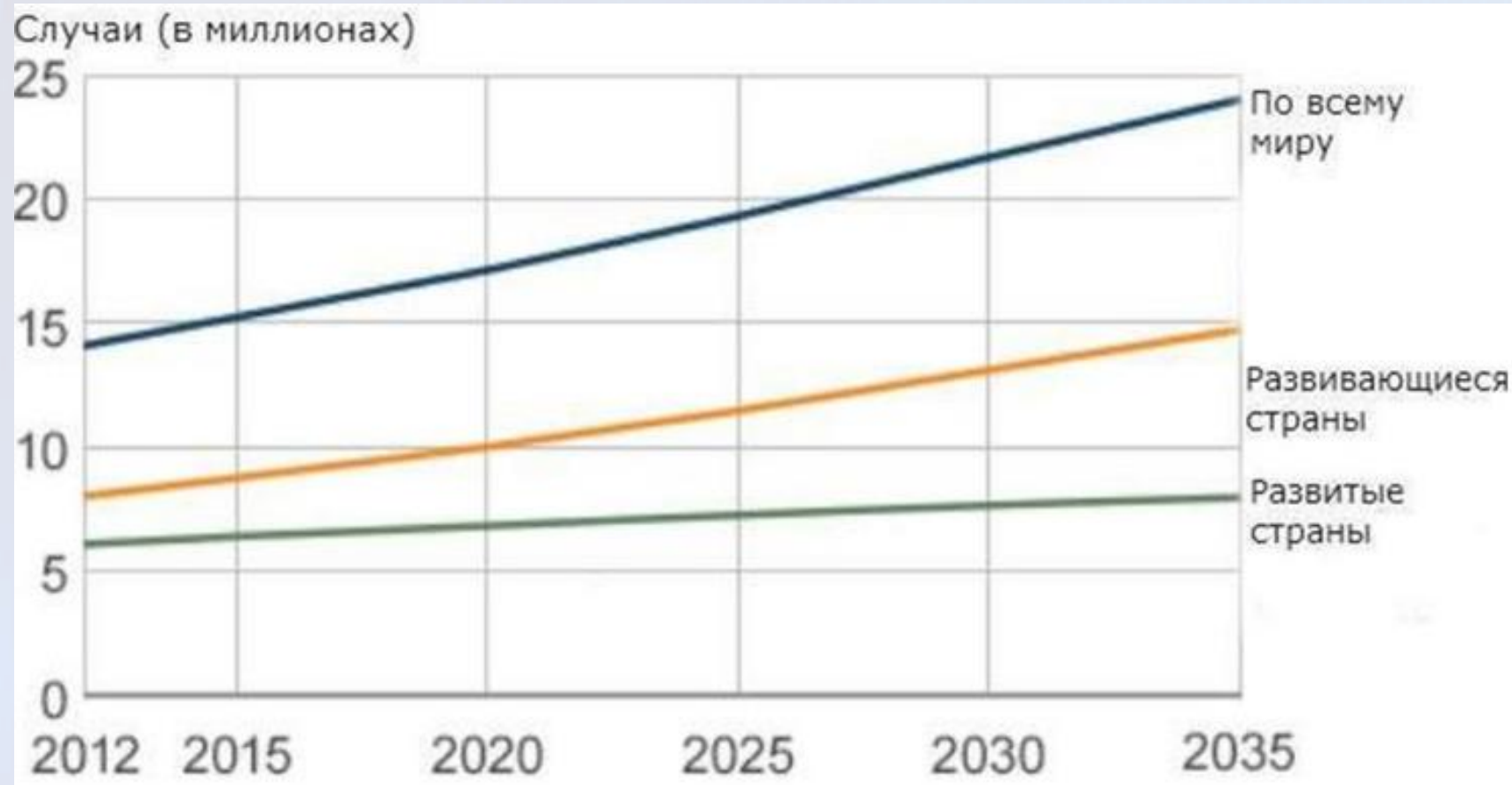
Международный научный семинар
«Перспективные направления развития энергетической безопасности ядерных и
радиационных технологий»
г. Минск, 20-22 мая 2025 г.



- 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-zabolevaniam-2021.html> (по состоянию на октябрь 2024 г.)



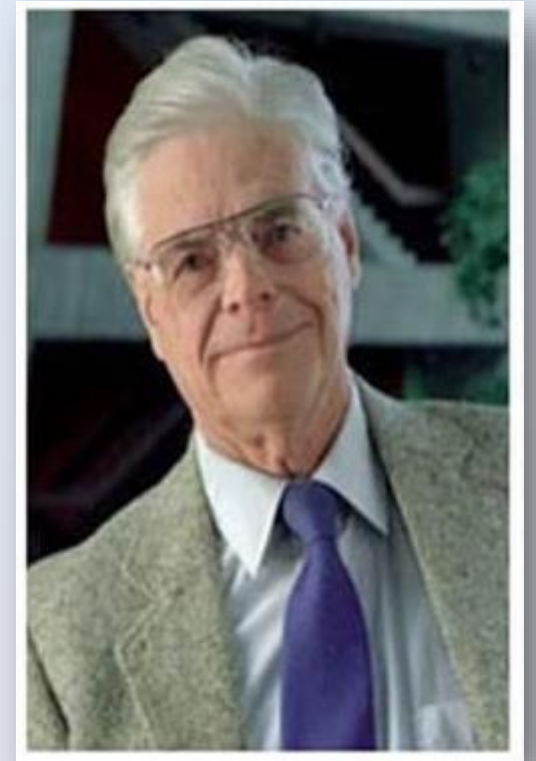
СТРУКТУРА ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ В ДИСТАНЦИОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ





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



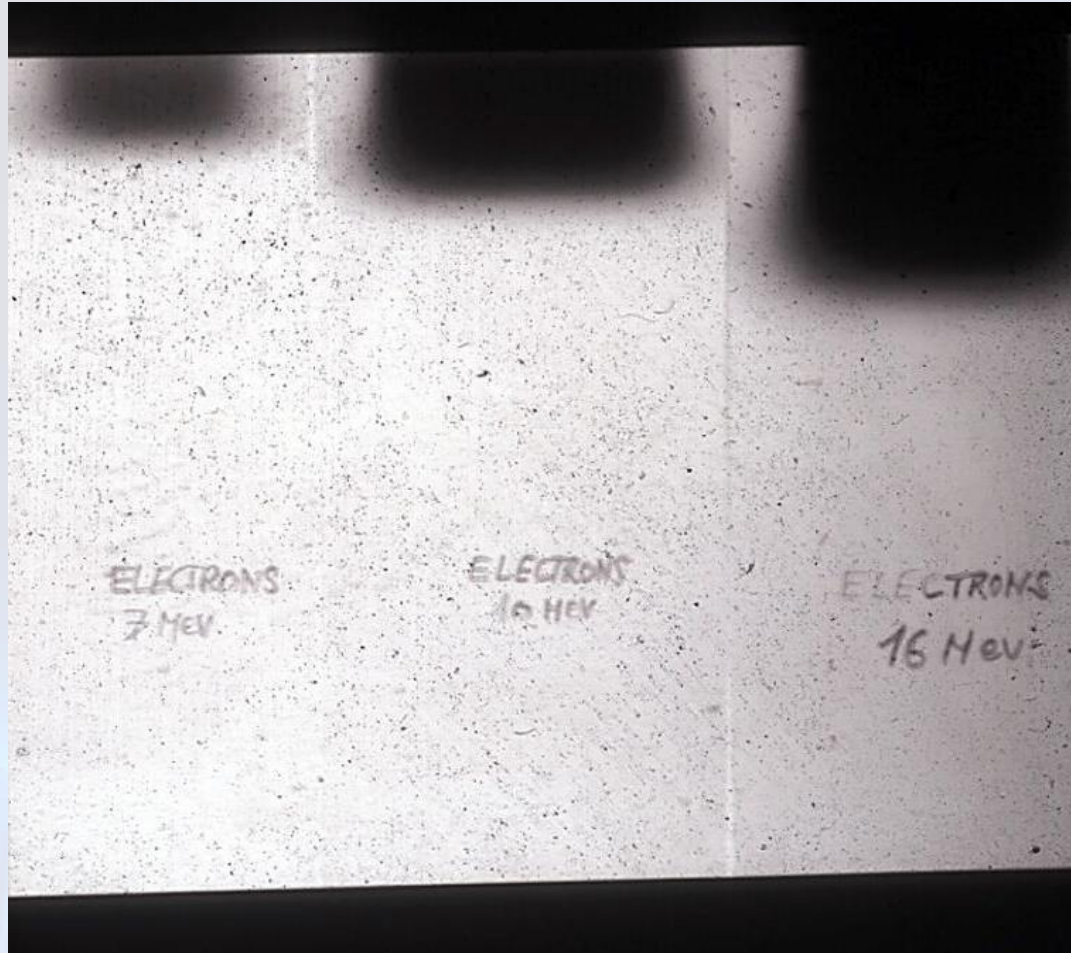
Robert Wilson

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



ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Электроны



Протоны/ионы



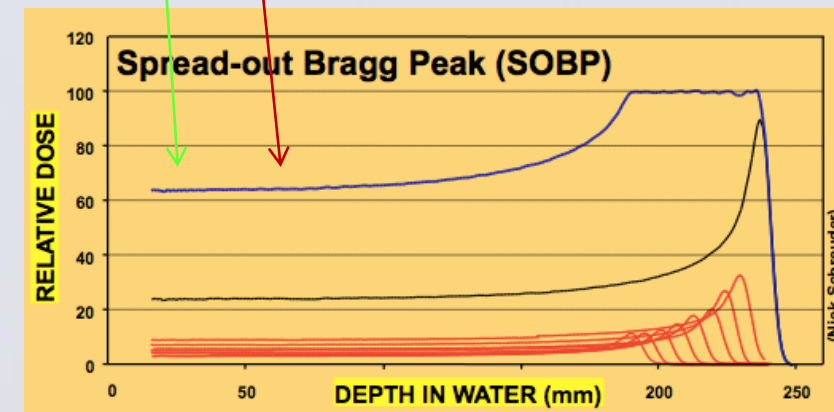
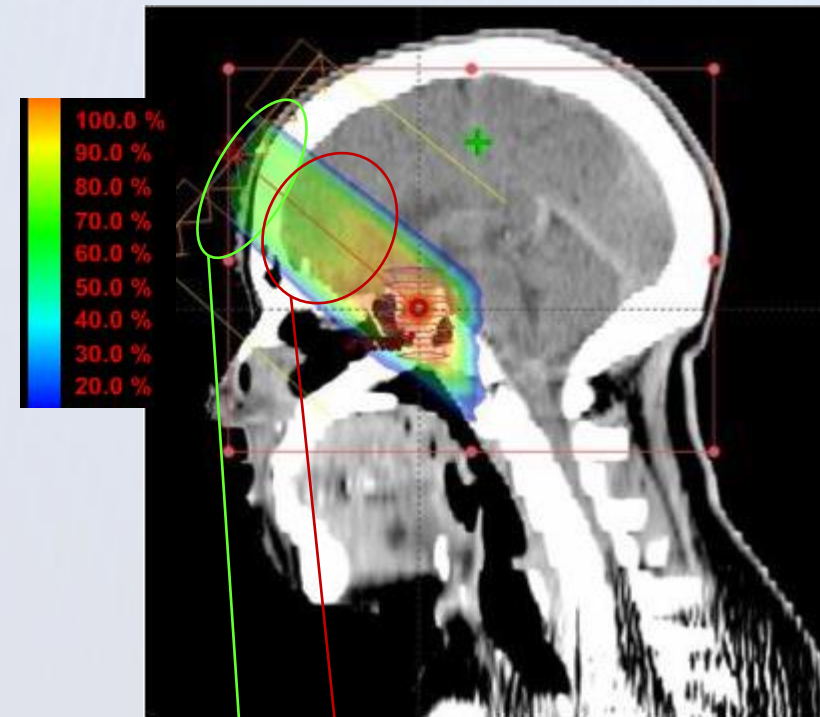
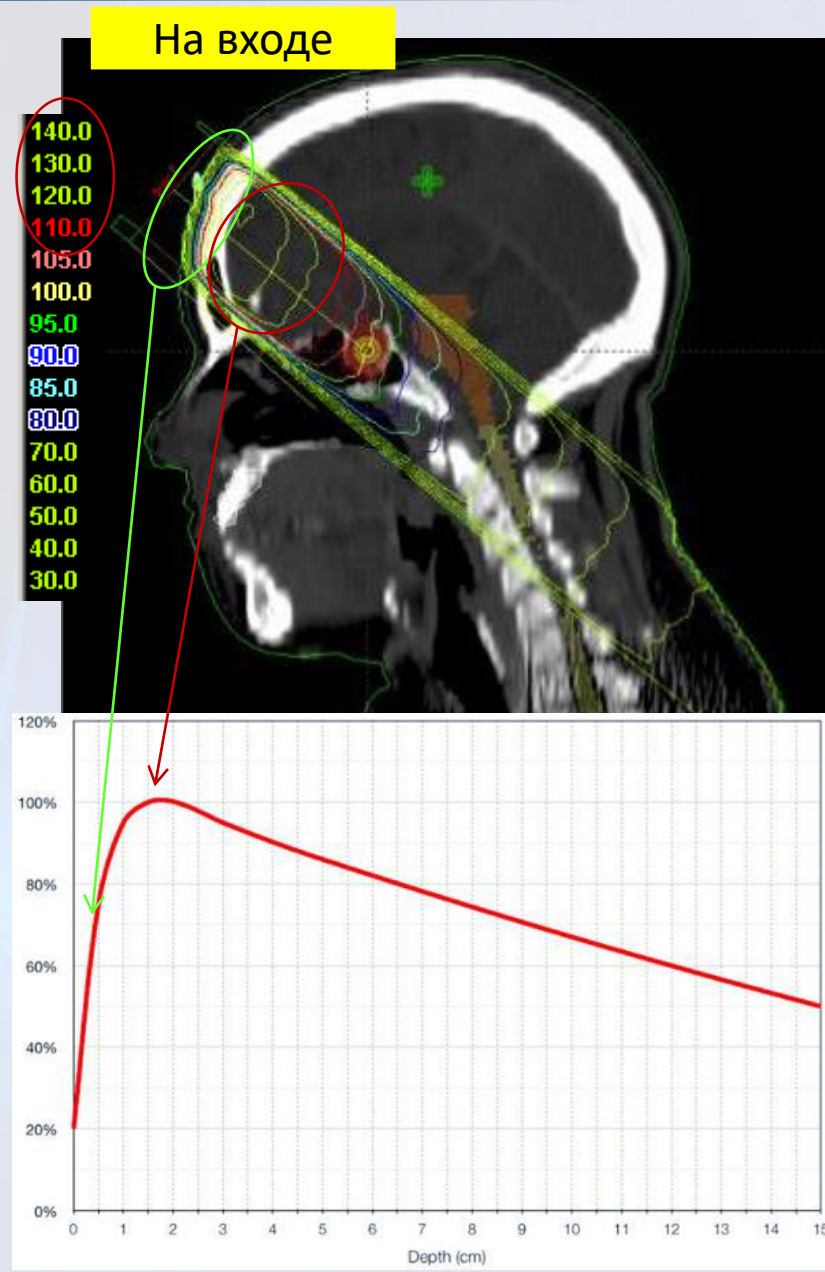
20 см

Фотоны





ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

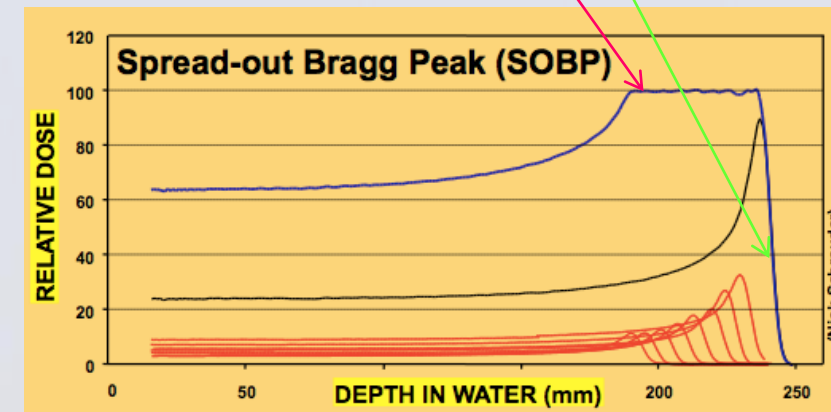
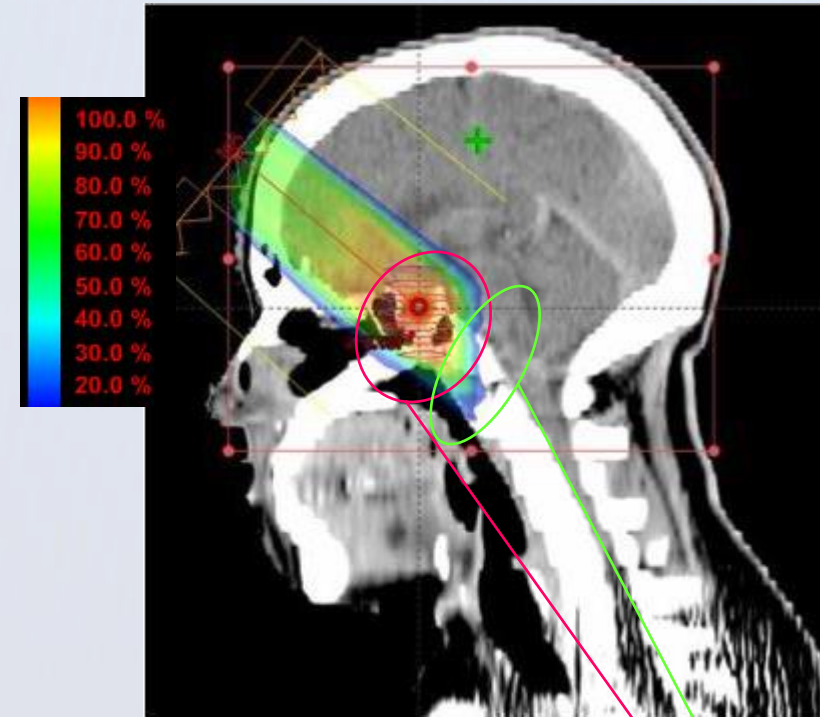
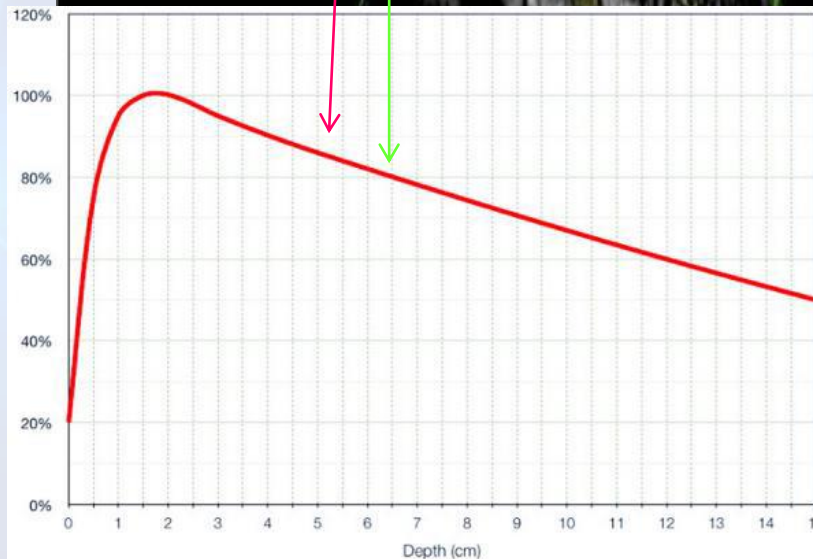
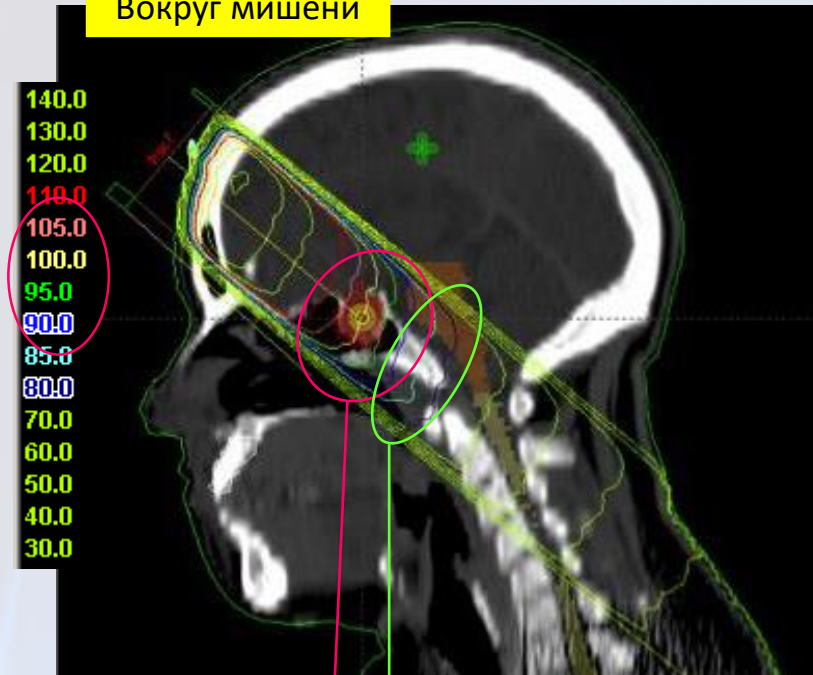


(Andy Kohler // graph : Niek Schreuder)



ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

Вокруг мишени



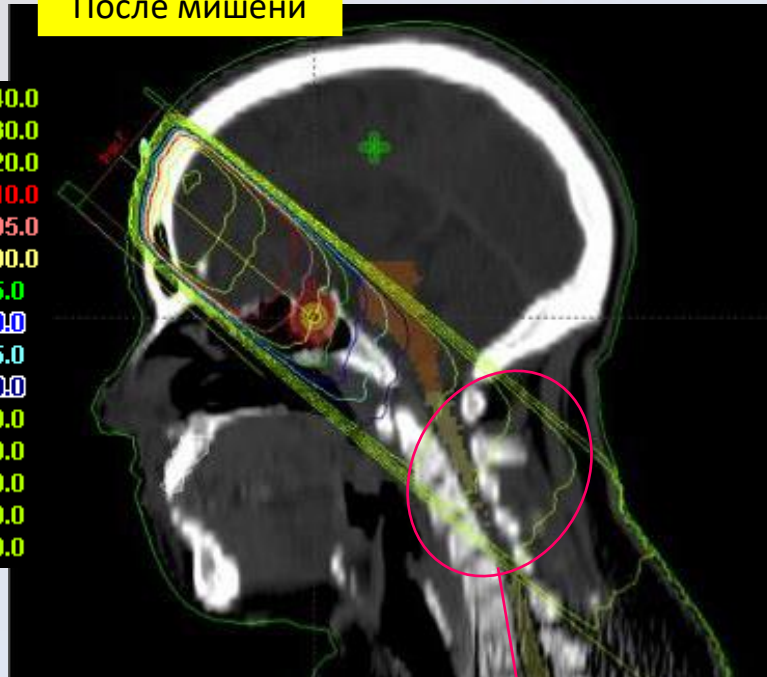
(Andy Kohler // graph : Niek Schreuder)



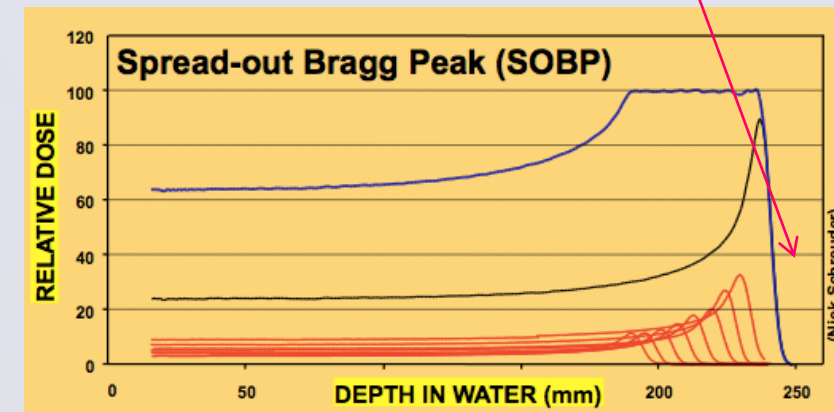
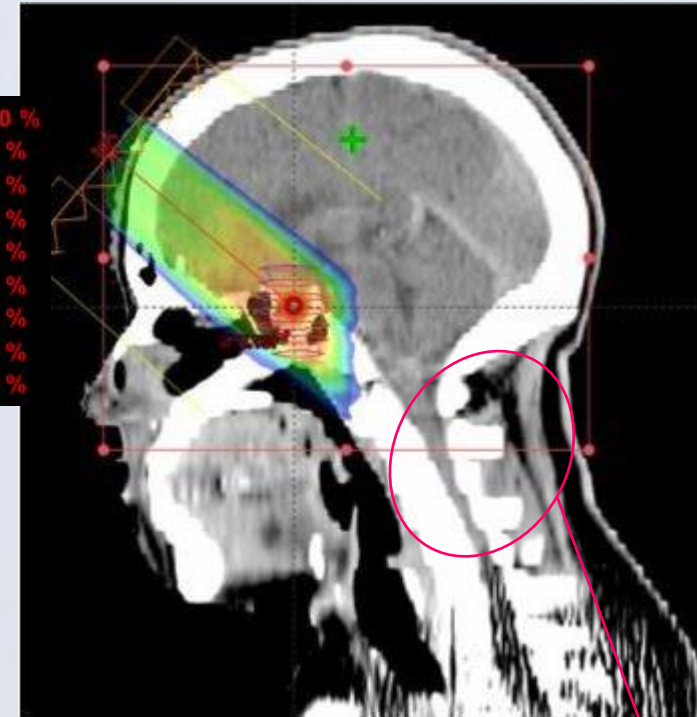
ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

После мишени

140.0
130.0
120.0
110.0
105.0
100.0
95.0
90.0
85.0
80.0
70.0
60.0
50.0
40.0
30.0

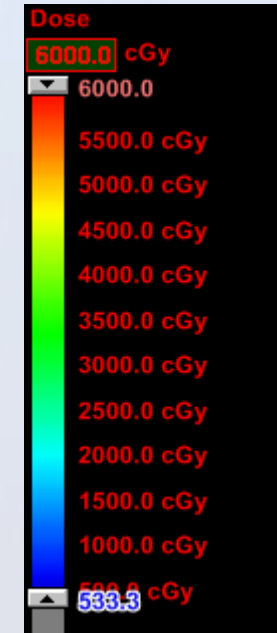
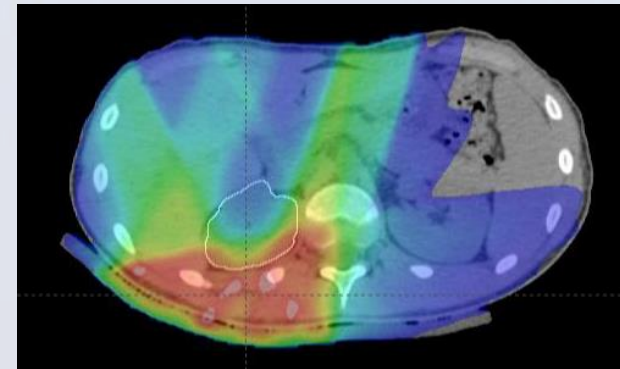
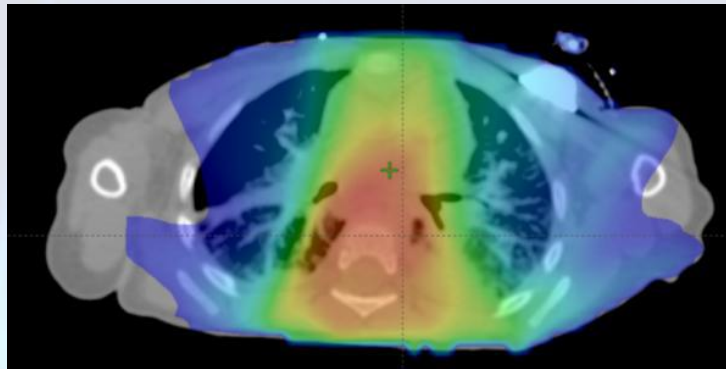
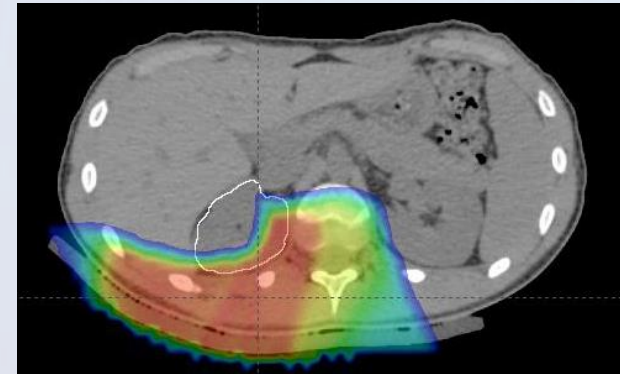
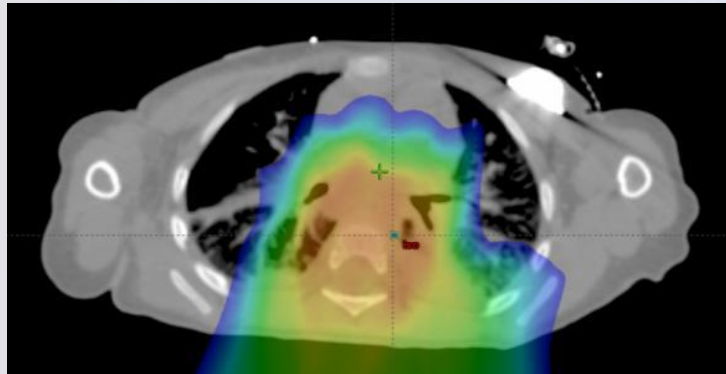


100.0 %
90.0 %
80.0 %
70.0 %
60.0 %
50.0 %
40.0 %
30.0 %
20.0 %



(Andy Kohler // graph : Niek Schreuder)

Дозиметрическое сравнение протонной терапии и IMRT при саркоме 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.

Сегодня в мире:

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

Экспоненциальный рост центров протонной терапии



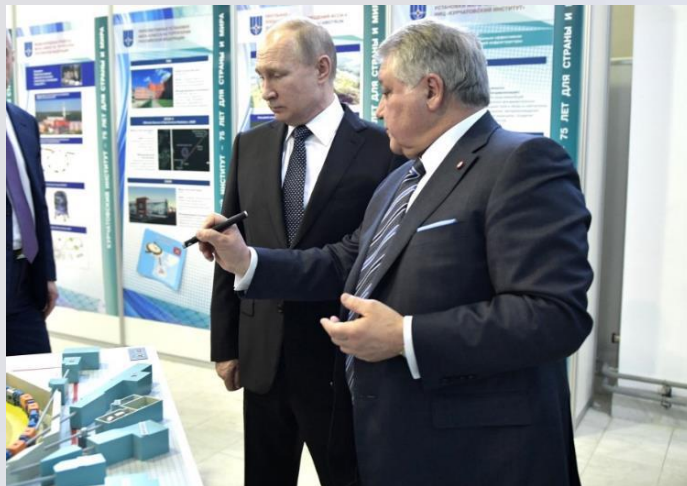


- С 1968 по 1975 гг. и с 1986 по 2019 гг. ЛЯП ОИЯИ Экспериментальный центр протонной лучевой терапии, пролечено 1300 пациента.
- С 1974 по 2013 гг. НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ Экспериментальный центр протонной лучевой терапии, пролечено 1352 пациента. С 2017 г. ведется модернизация и регистрация 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 IVA, Бельгия);
- В октябре 2017г. введен 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);





ФНТП «РАЗВИТИЕ СИНХРОТРОННЫХ И НЕЙТРОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ»



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 п о с т а н о в л я ю:

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 апробации, с целью **внедрения отечественных технологий ПЛТ** в субъектах Российской Федерации и обеспечения **доступности высокотехнологичной медицинской помощи**.

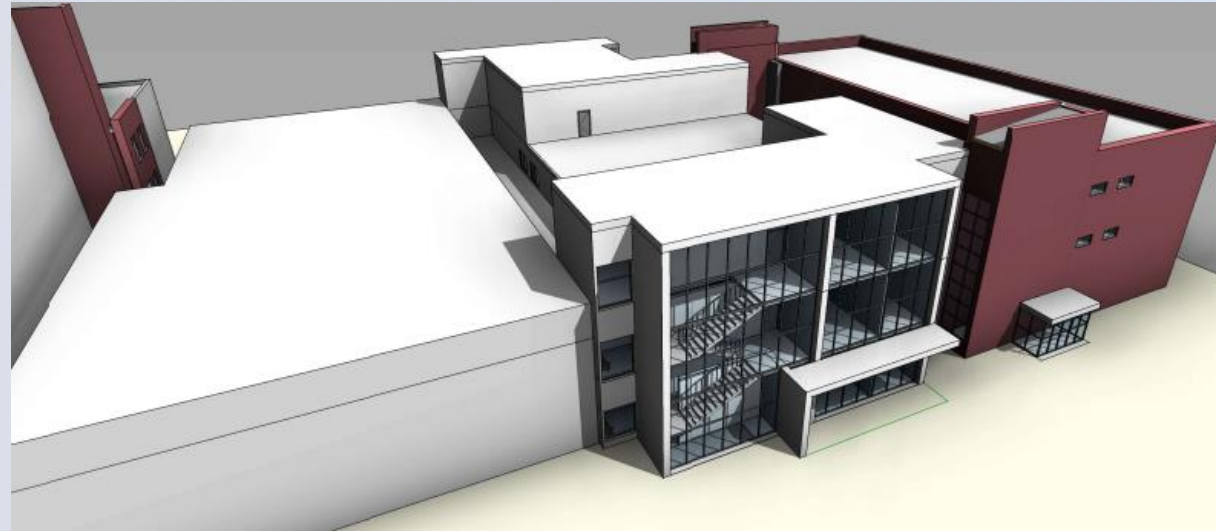
Стратегические задачи:

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 апробации** 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



РЕКОНСТРУКЦИЯ ЗДАНИЯ №145 С ЦЕЛЬЮ СОЗДАНИЯ КОМПЛЕКСА ПРОТОННОЙ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ «ЛУЧ-ПРОТОН»

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



Архитектурно-планировочные решения



Положительное заключение

ПАСПОРТ ОБЪЕКТА

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

Ввод в эксплуатацию - 2028 год.

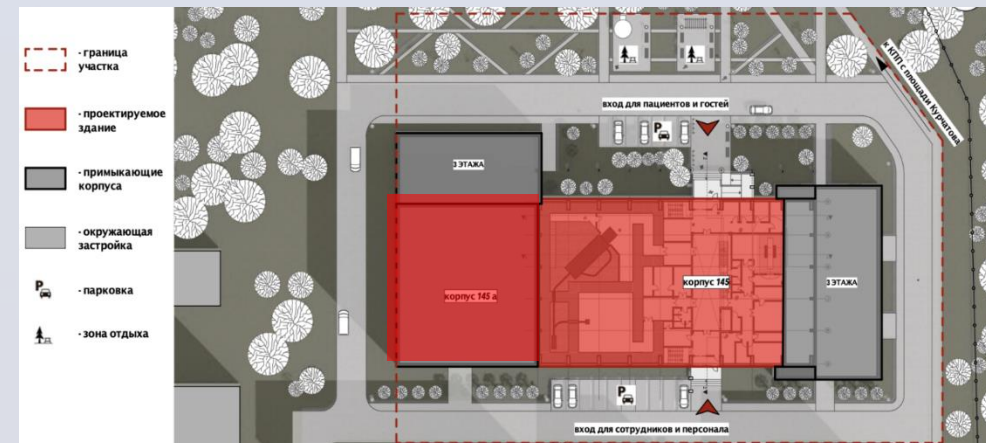




СХЕМА КОМПЛЕКСА «ЛУЧ-ПРОТОН»

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

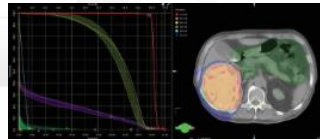
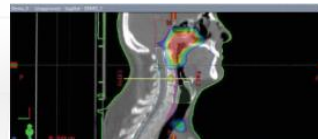
Дозовое распределение (ДР) — 20x20 см

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*



Медицинский синхротрон с каналами транспортировки

Энергия протонов: **70-250 МэВ**

Интенсивность: 5×10^{10} п/с

Размер пучка на выходе (σ): ~ 5 мм

Система позиционирования

2D и 3D система позиционирования
6D стол

Локализации: голова шея,
абдоминальной область.

Система позиционирования

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

Локализации: голова шея, глаза, предстательная
железа

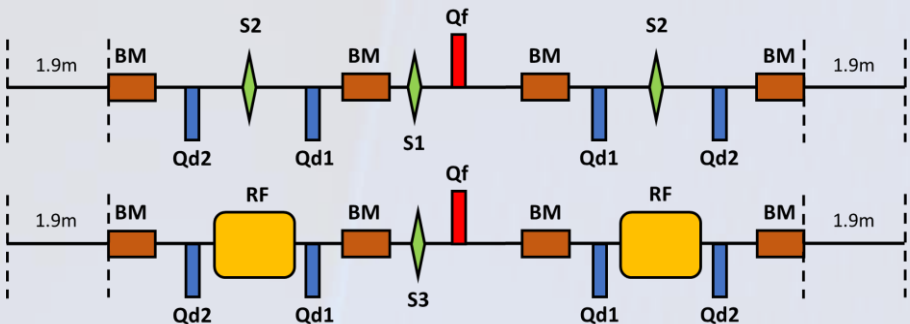
ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Энергия протонов: 70 - 250 МэВ

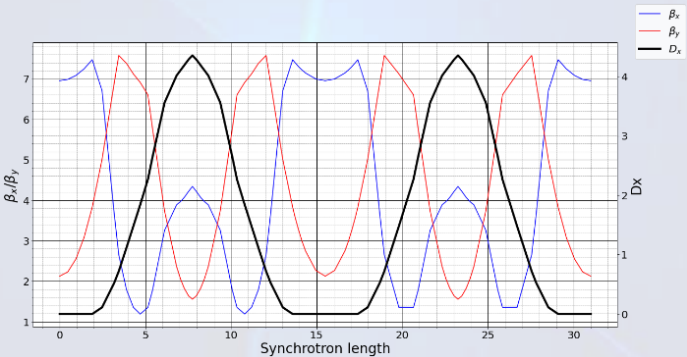
Шаг изменения энергии: 0,4 МэВ

Интенсивность: 5×10^{10} протон/с

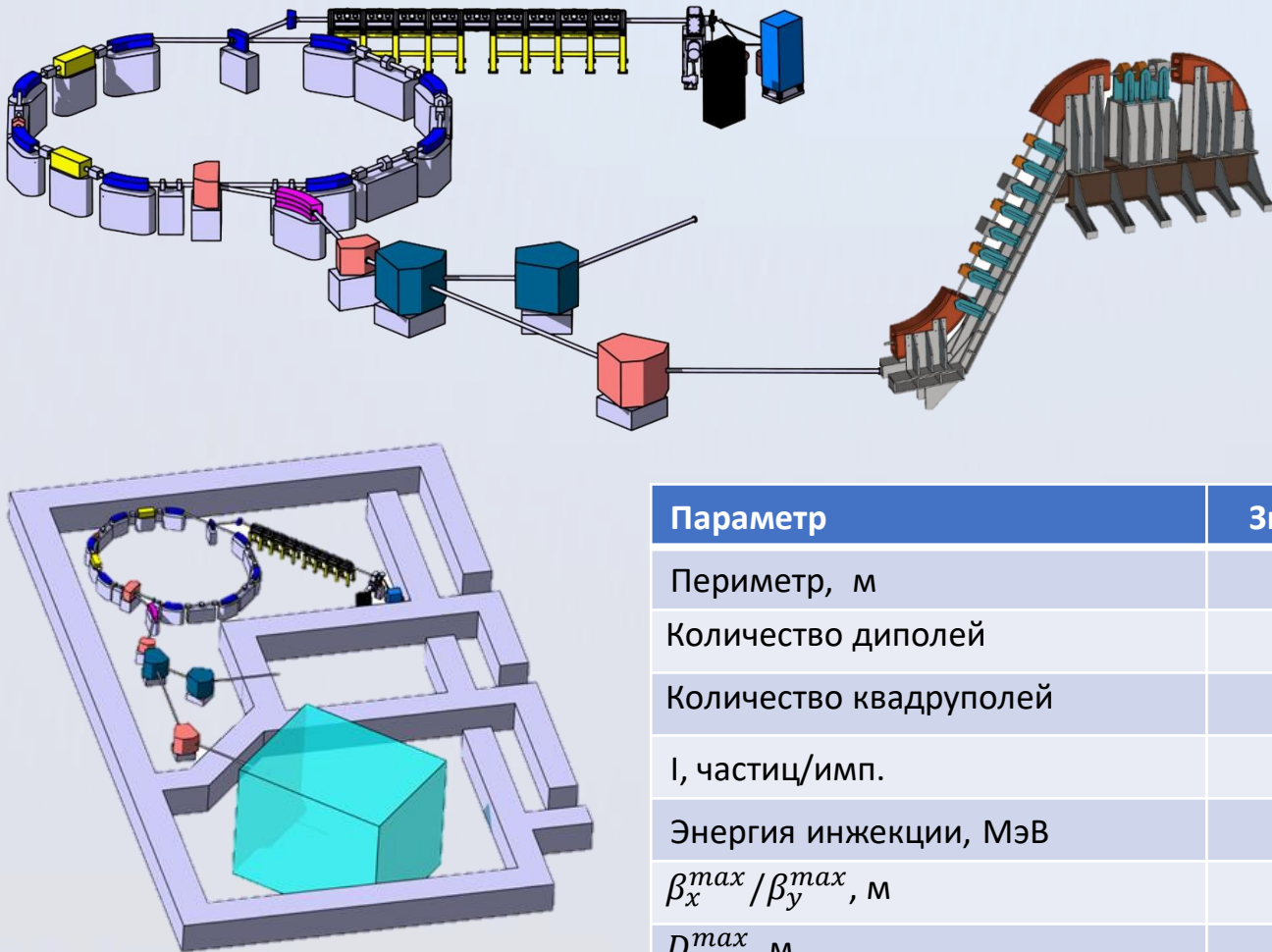
Время вывода: до 1с



2 суперпериода, поворот в диполях 45 градусов
8 диполей, 10 квадруполой
Прямолинейные промежутки с нулевой дисперсией



Ускоритель – протонный синхротрон с каналами вывода



Параметр	Значение
Периметр, м	31.0
Количество диполей	8
Количество квадруполой	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
Qx/Qu	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}

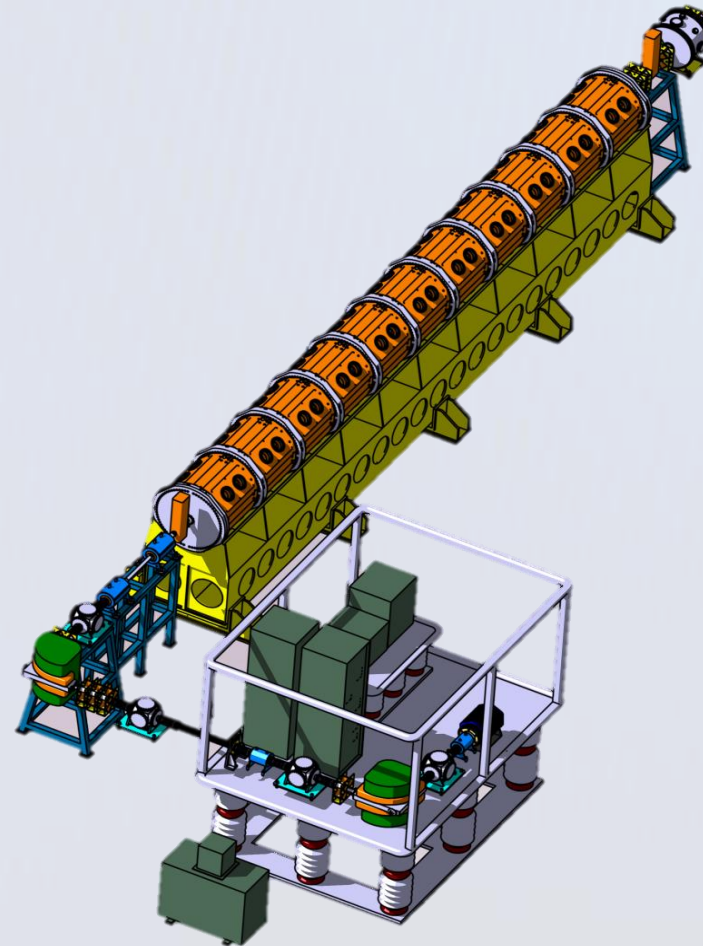
Частота повторения: 0.5 Гц

Энергетический разброс: (10 – 20) кэВ

Длительность импульса тока: 1.2 мксек

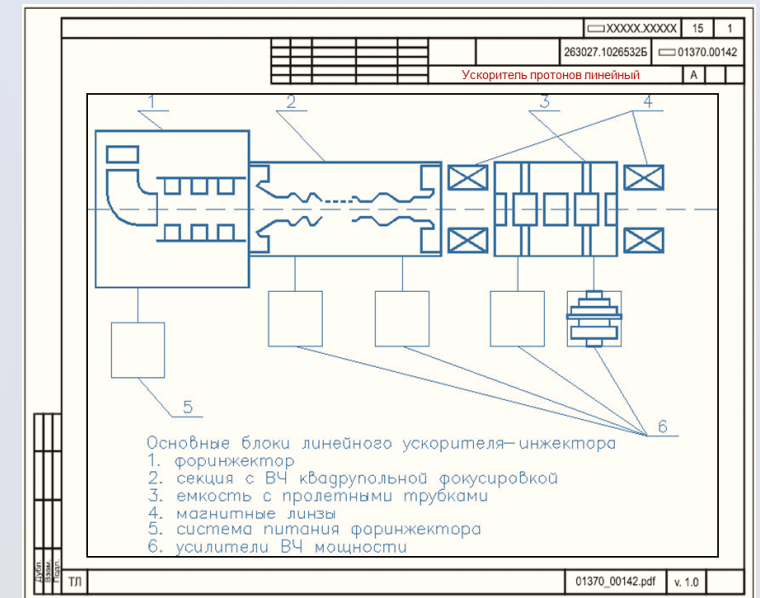
Длина ускорителя: 7 метров

Темп ускорения: 0,7 МэВ/м



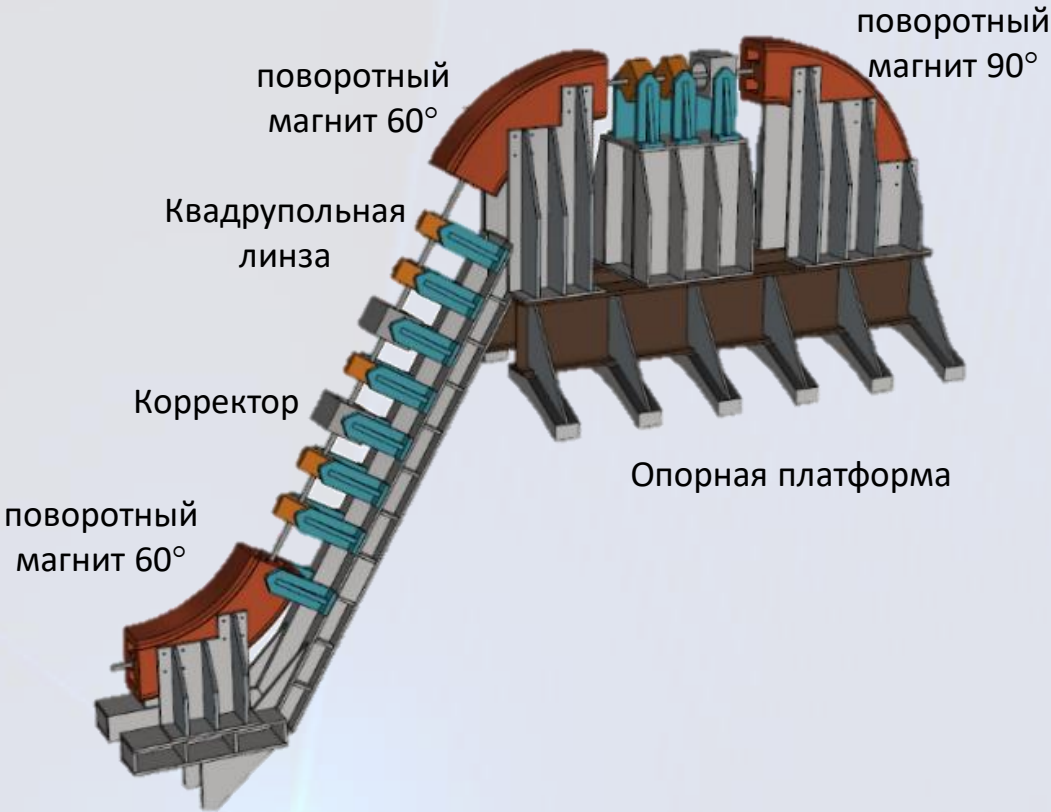
ИНЖЕКТОР – ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ ПРОТОНОВ

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



Аналог инжектора. Примерная длина 5 м.

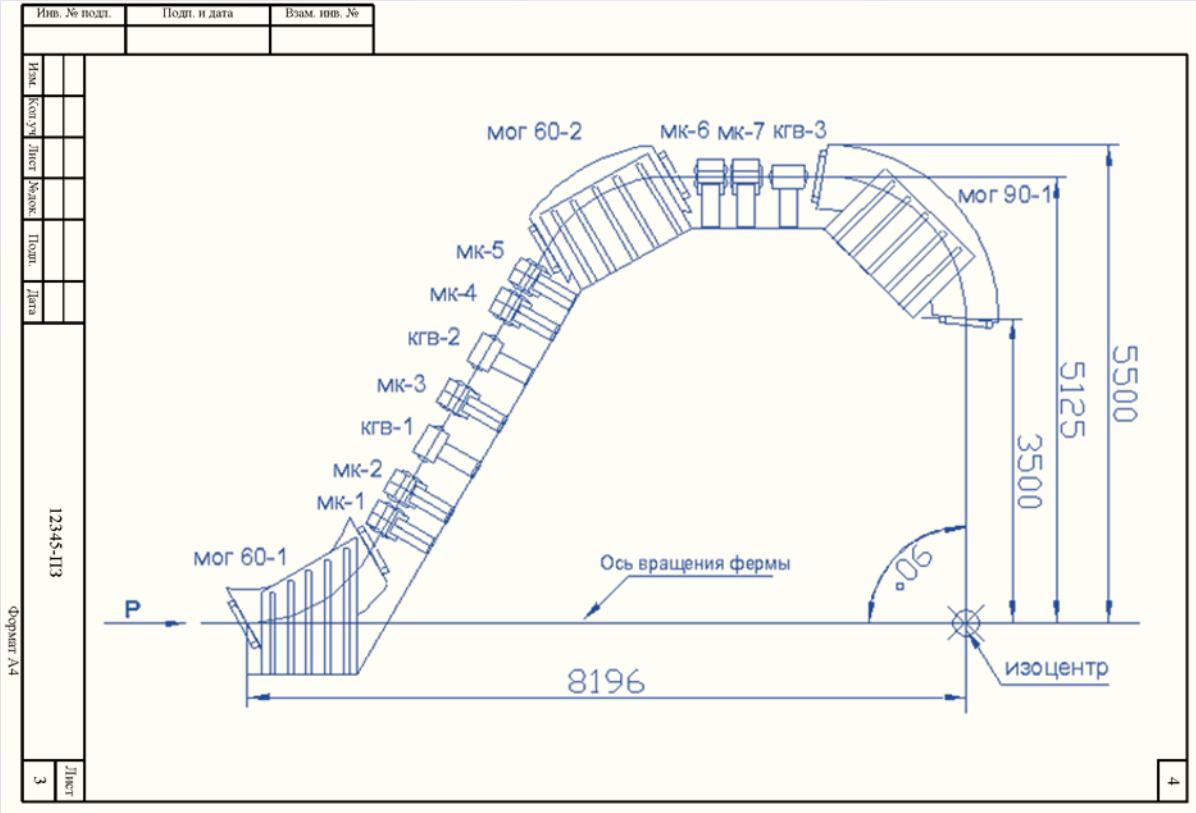
СХЕМА МАГНИТООПТИЧЕСКОГО КАНАЛА ГАНТРИ



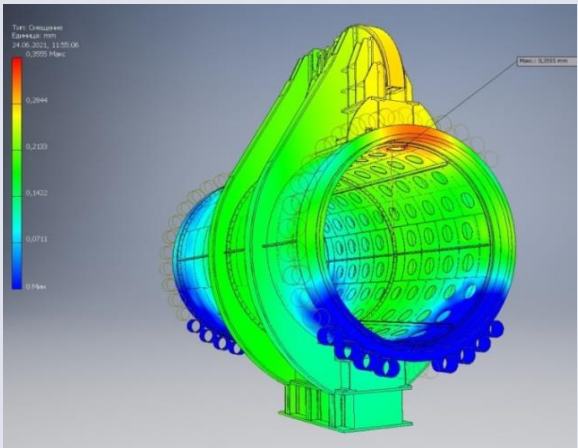
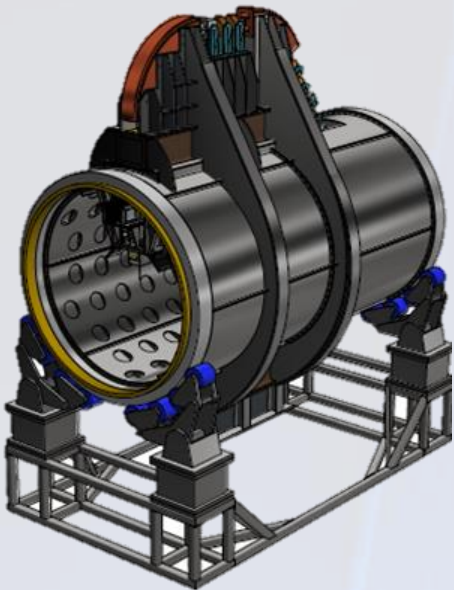
Основные магнитооптические элементы:

- 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 $D_x, D_y = 0$
Пучок на выходе	$\sigma_x, \sigma_y < 3 \text{ mm}, \sigma_x', \sigma_y' < 0,3 \text{ mrad}$
Виртуальный SAD	3,5 м

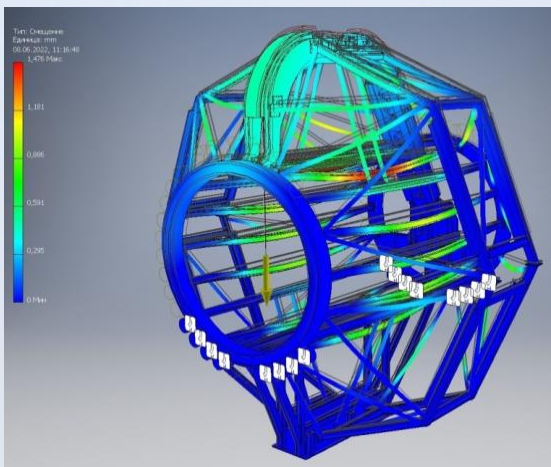
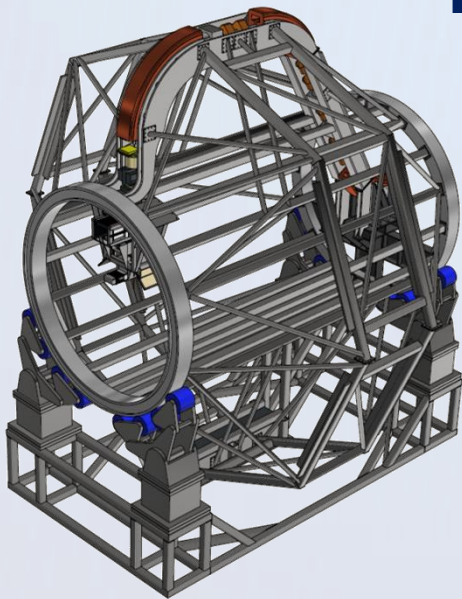


ТИП А



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 **$\pm 185^\circ$**

Система **активного** формирования дозового распределения;

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

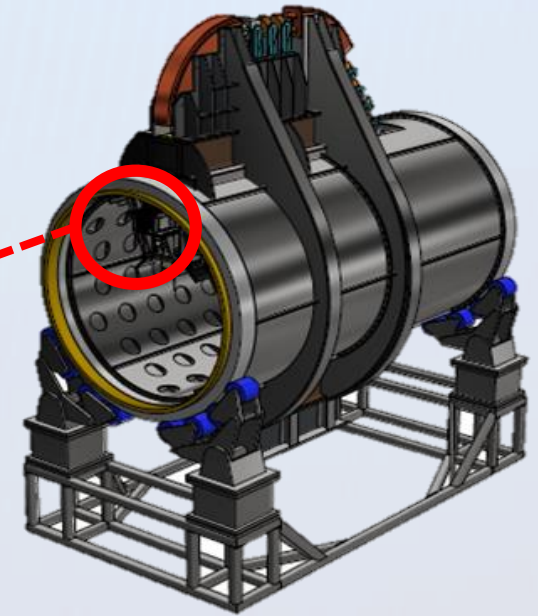
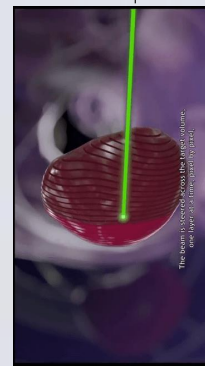
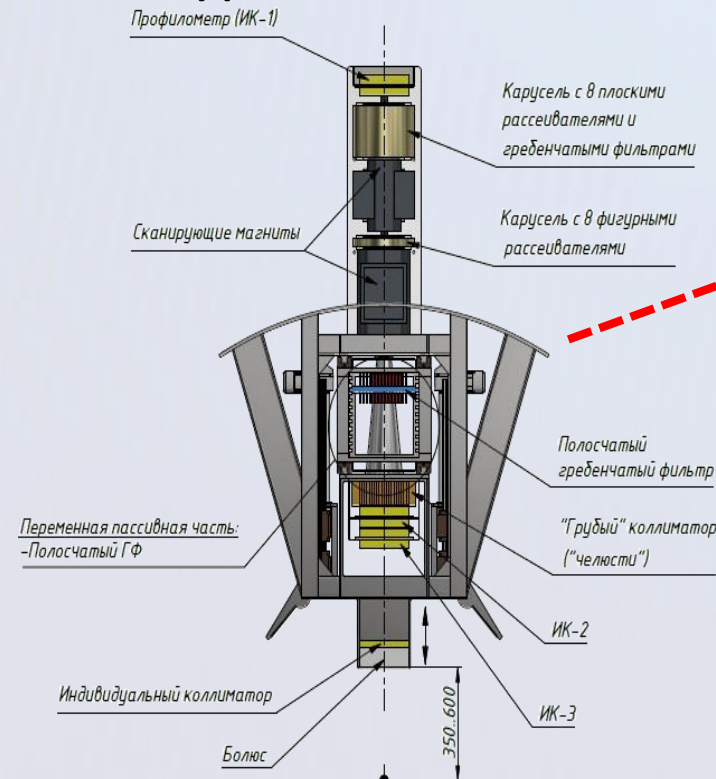


- 6D стол позиционер;
- 2D и 3D система рентгеновского позиционирования

ЛОКАЛИЗАЦИИ:

- голова шея;
- новообразования абдоминальной области

СИСТЕМА ФОРМИРОВАНИЯ ДОЗОВОГО ПОЛЯ



ПОДГОТОВЛЕНЫ ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАДАНИЯ



СОСТАВ КОМПЛЕКСА «ЛУЧ-ПРОТОН» – ЛУЧЕВАЯ УСТАНОВКА С ГОРИЗОНТАЛЬНЫМ ФИКСИРОВАННЫМ ПУЧКОМ

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

Энергия протонов 70—250 МэВ

Активная система формирования дозового распределения:

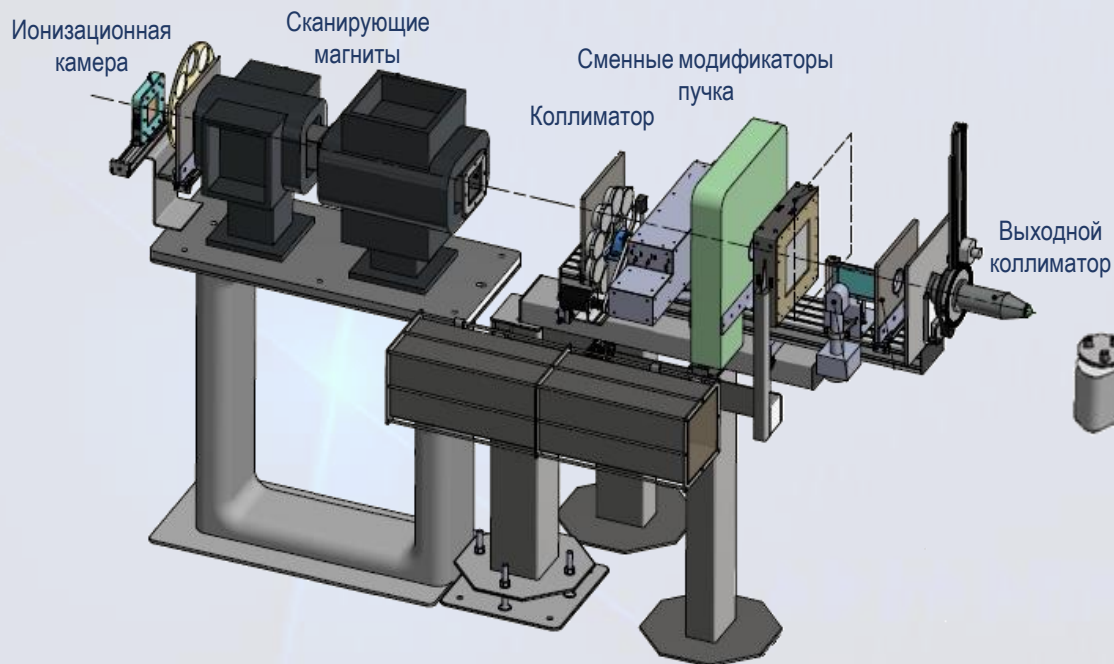
- область дозового распределения — 40x40 см
- технология формирования требуемого дозового распределения – «воксельное» сканирование.

Пассивная система формирования дозового распределения:

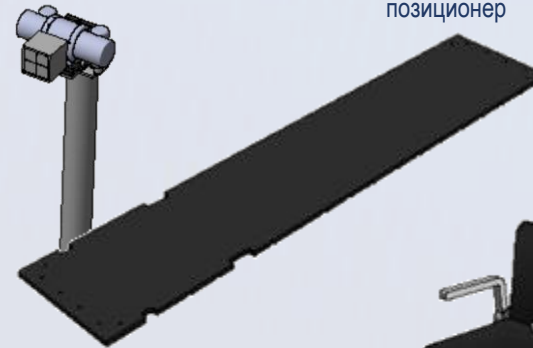
- Область дозового распределения — $\varnothing 50$ мм

Параметры пучка в изоцентре установки:

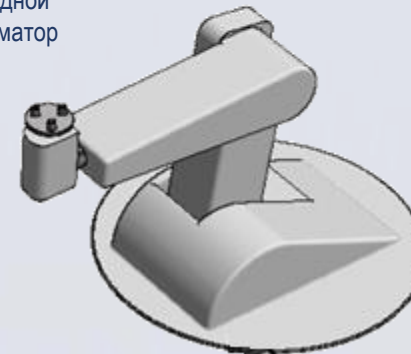
- размер пучка в σ не более 3 мм, при энергии пучка 250 МэВ и не более 8 мм, при энергии пучка 70 МэВ (значения для промежуточных величин энергии экстраполируются);
- сечение пучка имеет: круглую симметричную форму



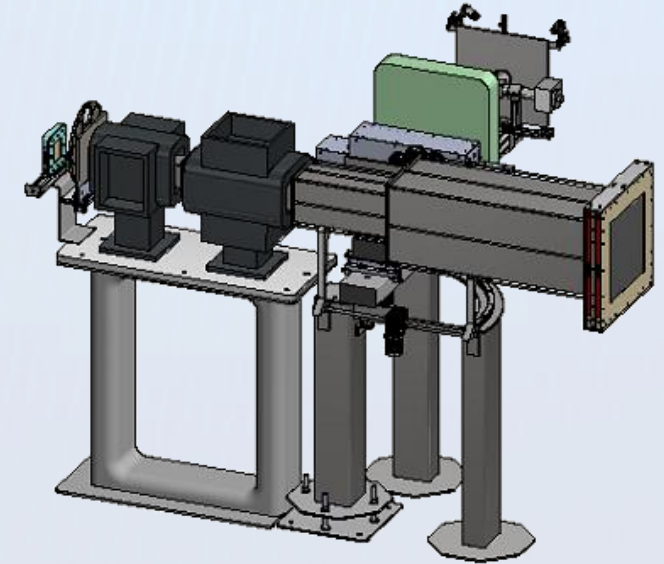
2D система рентгеновского
позиционирования



Универсальный
позиционер



Роботизированная
система
позиционирования



Система формирования дозового
распределения для двух режимов работы

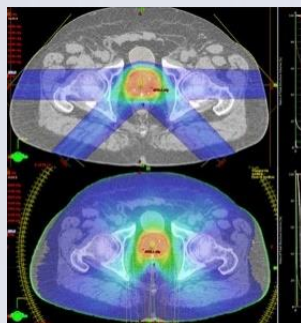
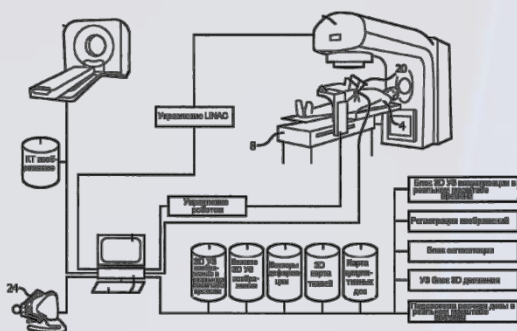
ЛОКАЛИЗАЦИИ:

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

**ЗАКЛЮЧЕН КОНТРАКТ НА ПОСТАВКУ
ОБОРУДОВАНИЯ**



СОСТАВ КОМПЛЕКСА «ЛУЧ-ПРОТОН» – ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС



ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС (ПАК):

Медицинская информационная система (МИС)

Радиологическая информационная система (РИС)

Система дозно-анатомического планирования (СДАП)

Система хранения и обработки дозиметрических данных (СХОДД)

АСУ ТП

ПАК

КТ-томограф
МРТ - томограф



МИС

СИИХ

РИС

СХОДД

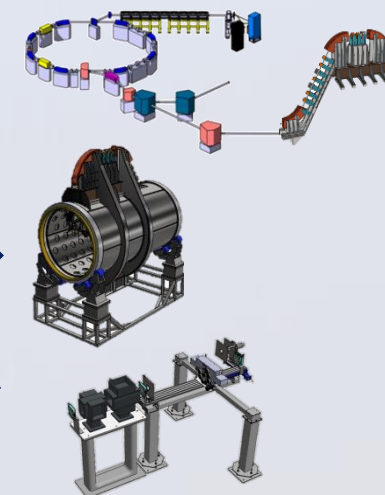
СДАП

АСУ ЛУ
ГФП

Пульты

АСУ ЛУ
гантри

АСУ
ускорителя и
тракта пучка



**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!