

# Разработка ускорителей электронов в НИИЯФ МГУ

к 75-летию НИИЯФ МГУ

В.И. Шведунов

15 февраля 2021 г.

# Этапы развития ускорительной тематики в ОЭПВАЯ

- 1. 1982 – 1985** – поиск путей дальнейшего развития научных исследований в отделе, физическое обоснование необходимости создания ускорителя электронов непрерывного действия.
- 2. 1985 – 1992** – разработка и реализация проекта разрезного микротрона непрерывного действия **для фундаментальных исследований**.
- 3. 1992 – 2012** – международное сотрудничество, разработка **лабораторных образцов** ускорителей электронов прикладного назначения по различным грантам.
- 4. 2012 – по н/в** – разработка и создание **промышленных образцов** ускорителей прикладного назначения.

# Ускоритель электронов для исследования фотоядерных реакций



Бетатрон НИИЯФ МГУ

Бетатрон НИИЯФ МГУ на энергию 35 МэВ к 1982 г. отработал 23 года. Его **преимущества** заключаются в простоте конструкции, возможности поимпульсного переключения энергии в широком диапазоне с малым шагом.

**Недостатки.** **Низкая интенсивность** – за цикл ускорения пучок проходит до 1500км, совершая около 500 тысяч оборотов. Из-за слабой фокусировки и низкого вакуума большая часть инжектированных в камеру бетатрона частиц теряется. В начале 80-х в отделе были проведены работы по увеличению интенсивности, но ...

**Импульсный характер излучения:** 3 мкс, 50 Гц, скважность около 6700, т.е. из 8760 часов в году измерение выхода продуктов реакций производится только в течение 1.3 часа! Сеансы набора статистики длятся месяцами, что приводит к большим систематическим погрешностям, большим затратам материальных и человеческих ресурсов. Невозможны эксперименты на совпадение.

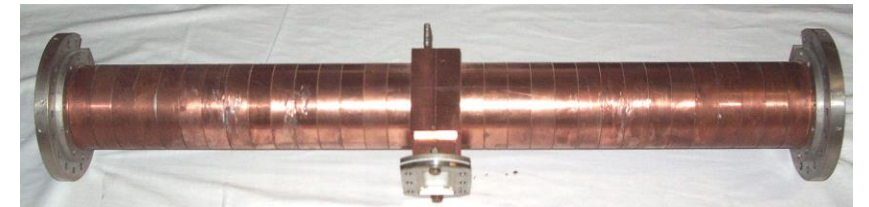
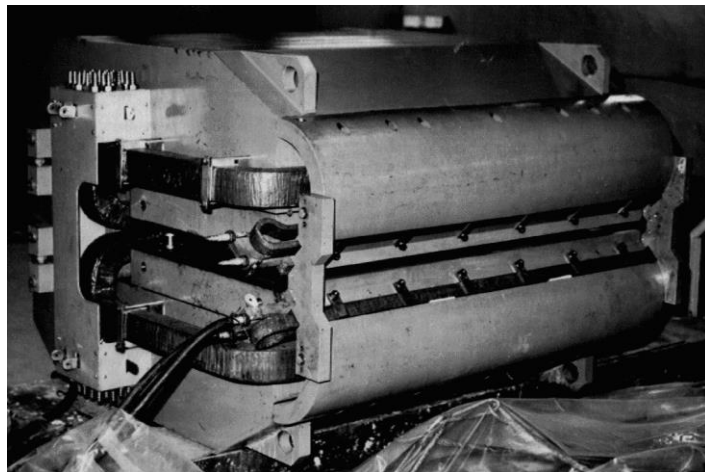
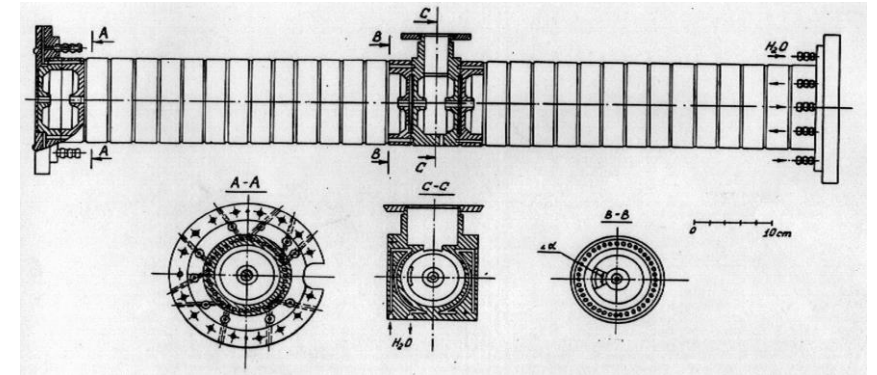
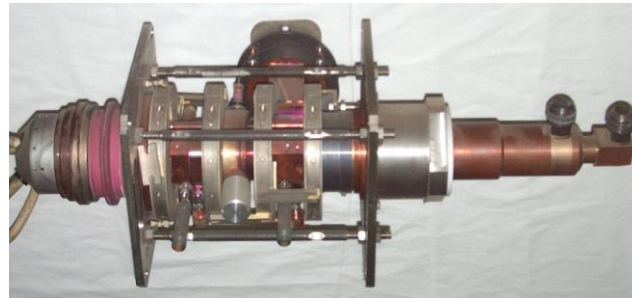
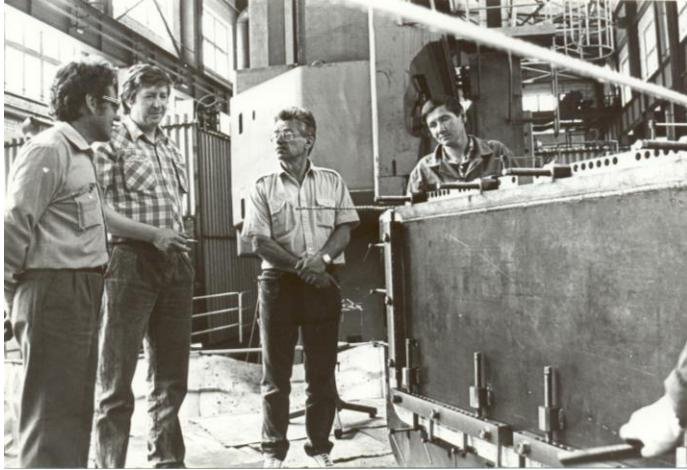
**Необходим ускоритель непрерывного действия.** Варианты: сверхпроводящие ускоряющие структуры, нормальнопроводящие структуры, растяжители (стретчеры) пучка. Выбран вариант нормальнопроводящего разрезного микротрона.

## **Организация Б.С. Ишхановым работ по созданию разрезного микротрона непрерывного действия НИИЯФ МГУ**

- В 1985 г. принято решение Ученого совета НИИЯФ МГУ о реализации проекта.
- К работам привлечена большая часть сотрудников отдела, студенты, аспиранты и сотрудники кафедры ускорителей и других кафедр физического факультета, различные службы института (механические мастерские НИИЯФ МГУ и физического факультета, КБ НИИЯФ МГУ, служба главного инженера, отдел снабжения, первый отдел ...).
- В отделе созданы две группы – ускорительная и группа контроля и управления, проводились регулярные совещания.
- Установлены контакты с различными организациями СССР, которые могли оказать помощь в создании ускорителя: НИИ «Титан» (сейчас НПП «Торий»), НПО «Исток», НИИФА, ОИЯИ, ФИАН, МИФИ, ИЯИ АН, ИФВЭ, ЕрФи, Саратовский гос. университет, СКБ (Харьков).
- Получено адекватное финансирование. По сегодняшним ценам стоимость приобретенного стандартного оборудования и материалов, стоимость изготовленного оборудования заметно превышает 1 млрд. руб.
- Построены два новых ускорительных зала. Дооснащены мех. мастерские отдела. Получены новые помещения в 19 корпусе.



# Изготовление элементов разрезного микротрона



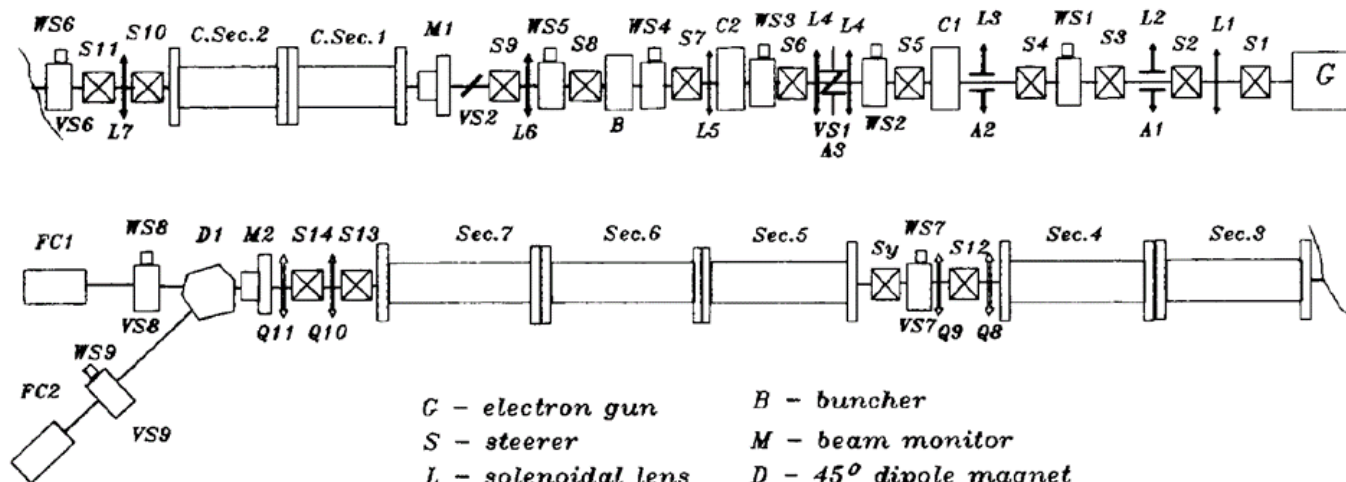
**Многолучевой клистрон**  
 Частота  $2450 \pm 10$  МГц  
 Макс. мощность 22 kW  
 Число лучей 18  
 Фокусировка постоянными магнитами

**Ускоряющая структура на стоячей волне**  
 Рабочая частота  
 Эффективное шунтовое сопротивление  
 Темп набора энергии

2450 МГц  
 76 МОм/м  
 1 МэВ/м

**Поворотный магнит**  
 Магнитное поле 1.03 Т  
 Вес магнита 18 т

# Ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 6.2 МэВ – инжектор разрезного микротрона.



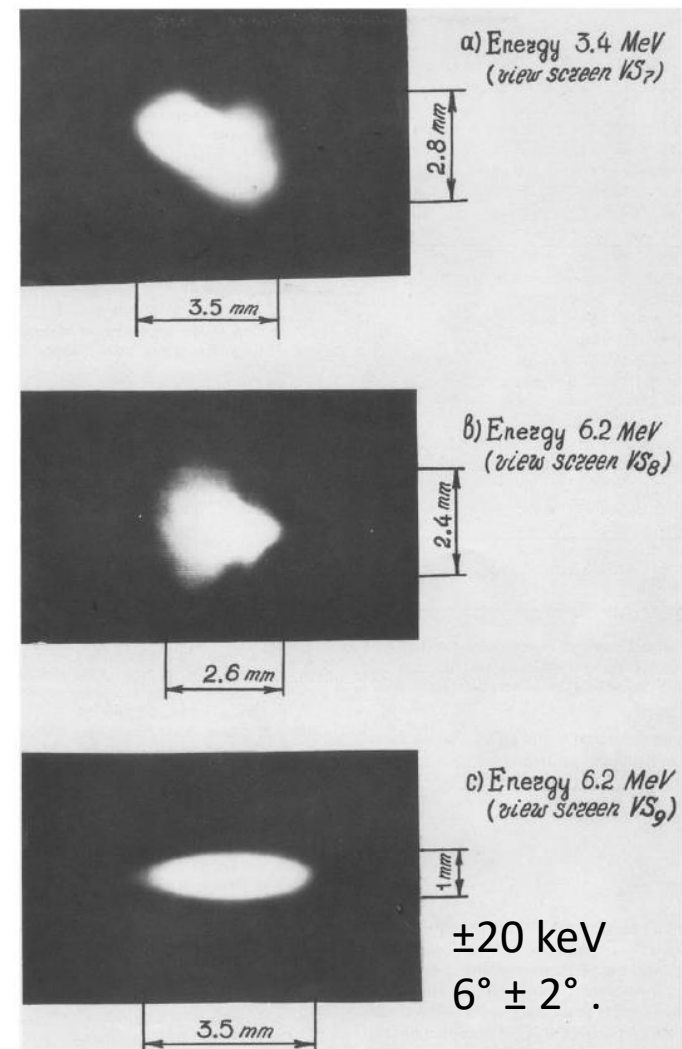
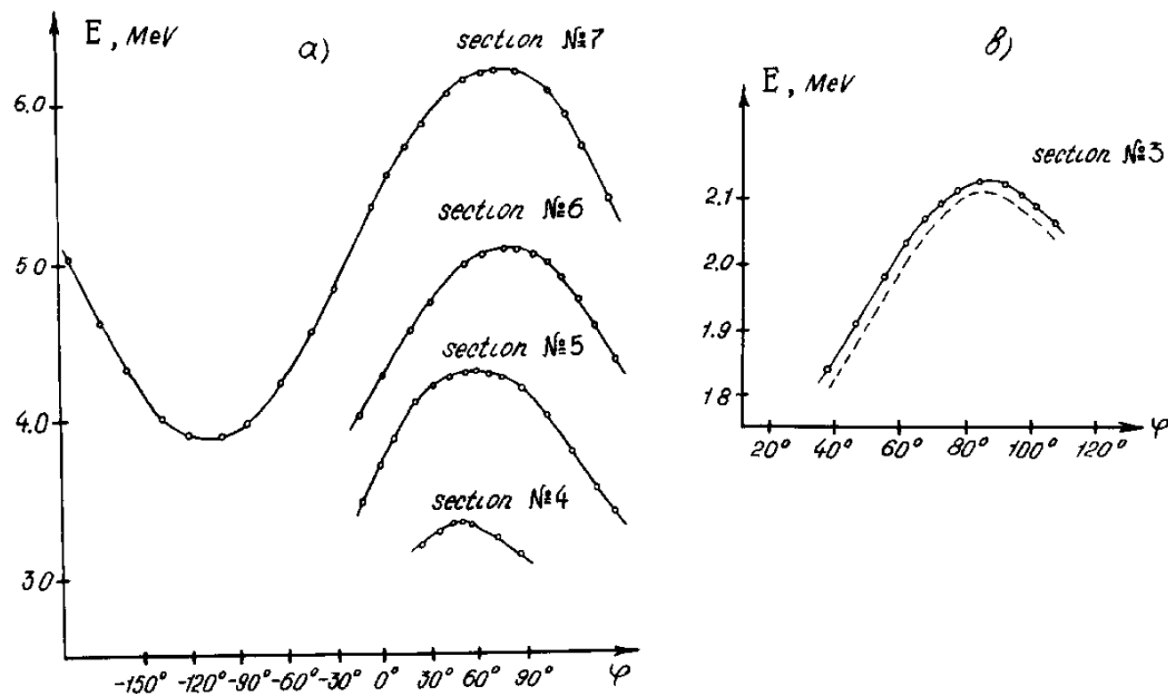
- |                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| <i>G</i> – electron gun    | <i>B</i> – buncher                 |
| <i>S</i> – steerer         | <i>M</i> – beam monitor            |
| <i>L</i> – solenoidal lens | <i>D</i> – 45° dipole magnet       |
| <i>A</i> – aperture        | <i>Q</i> – quadrupole lens         |
| <i>WS</i> – wire scanner   | <i>C.Sec.</i> – capture section    |
| <i>C</i> – chopper cavity  | <i>Sec.</i> – accelerating section |
| <i>VS</i> – view screen    | <i>FC</i> – Faraday cup            |

## Параметры инжектора.

Максимальная энергия пучка	6.2 MeV
Максимальный средний ток пучка	1 mA
Монохроматичность	±0.3%
Длина сгустка	4 ps
Нормализованный эмиттанс	5 mm*mrad
Длина ускорителя	12 m
Потребляемая мощность	400 kW

# Ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 6.2 МэВ – инжектор разрезного микротрона.

В 1992 г. инжектор электронов разрезного микротрона был введен в действие, на нем были выполнены эксперименты по неупругому рассеянию фотонов ядрами и по взаимодействию электронного пучка с кристаллами.



Зависимость энергии на выходе секций от фазы поля.

NIM A326 (1993) 391-398

Изображения пучка

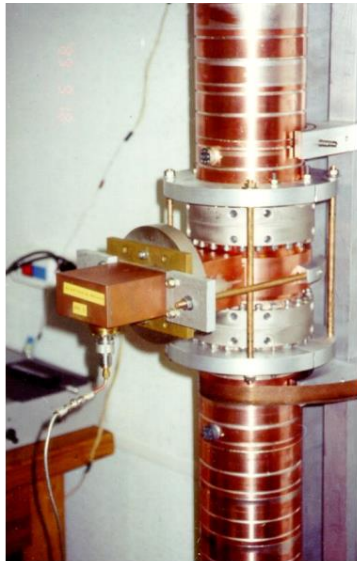


# 1993 – 2002. Сотрудничество с Институтом ядерной физики, университета г. Майнц

Upgrade инжектора MAMI, участие в разработке и реализации проекта MAMI-C



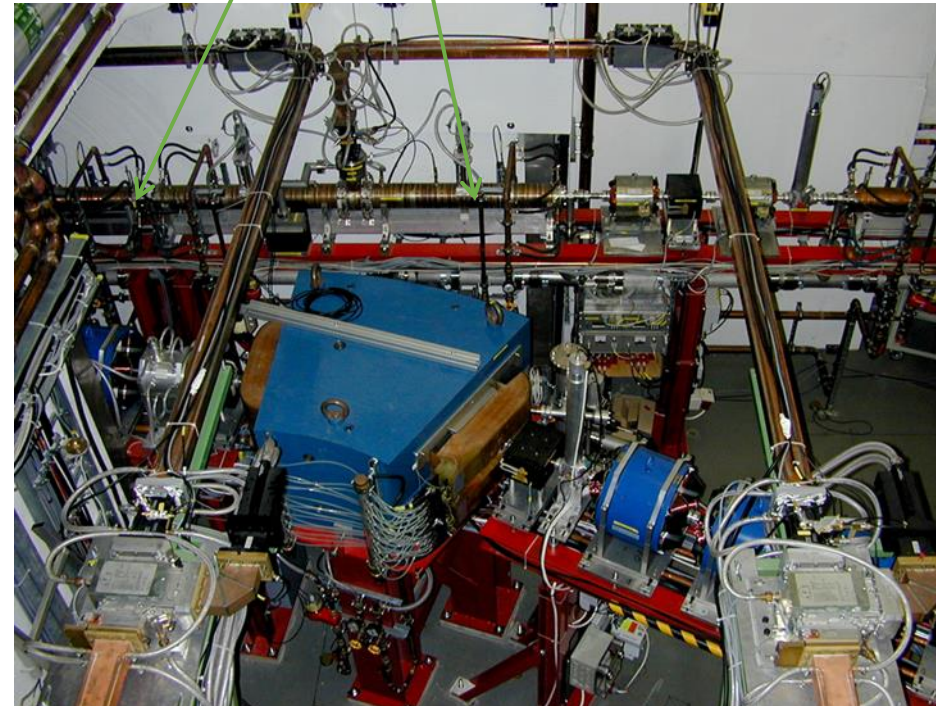
a)



b)

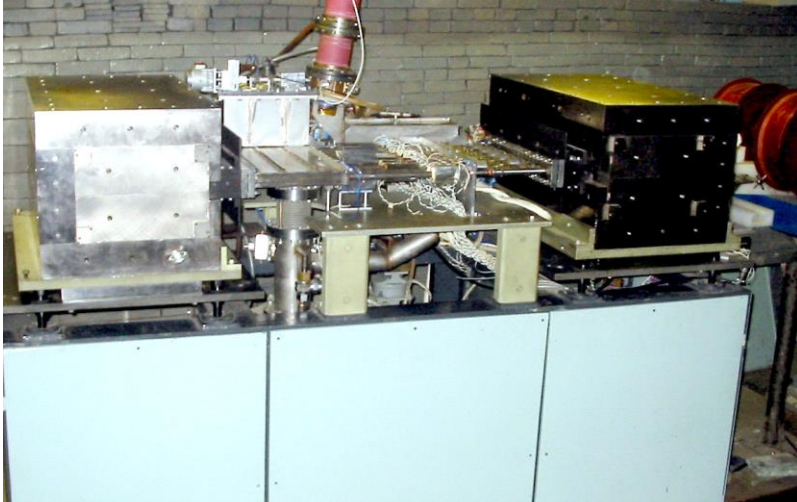
Секция ускоряющей структуры  
двухстороннего микротрона  
непрерывного действия, 2450 МГц, 2.02 м

Секции, установленные в двухстороннем  
микротроне непрерывного действия  
MAMI-C на энергию 1.5 ГэВ, Институт  
ядерной физики, г. Майнц, Германия

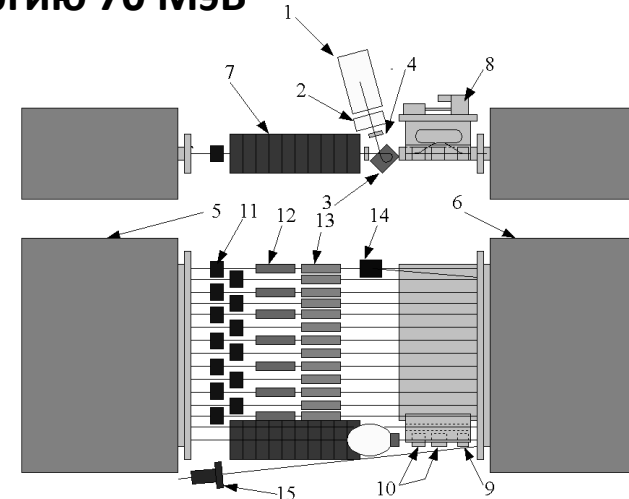


# 1992-2004. Сотрудничество с World Physics Technologies (США)

## Импульсный разрезной микротрон на энергию 70 МэВ



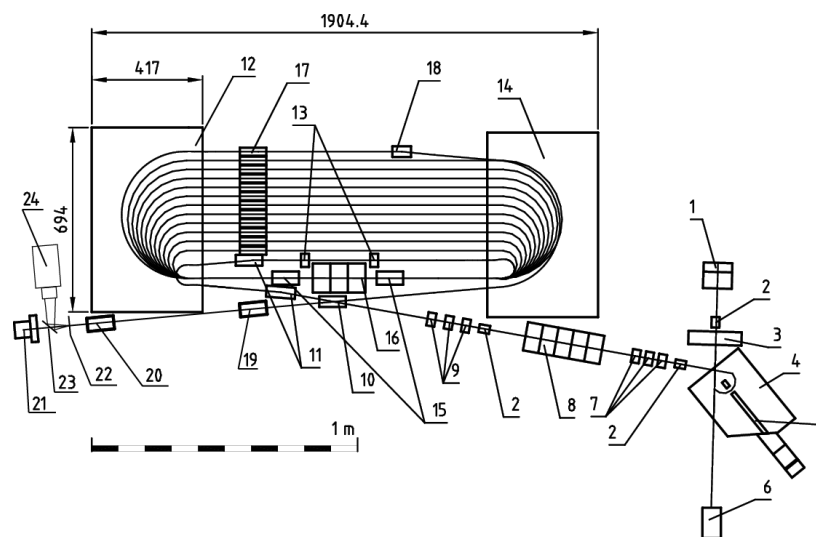
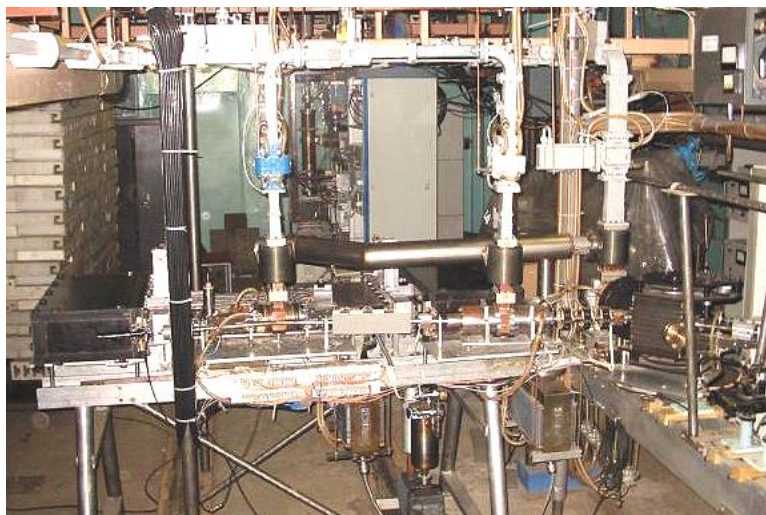
- Большие поворотные магниты с уровнем поля  $\sim 1$  Т на основе редкоземельных магнитов (РЗМ)
- Прямоугольная ускоряющая структура с высокочастотной квадрупольной фокусировкой
- Устройство регулирования длины первой орбиты
- Компактные квадрупольные триплеты на основе РЗМ
- Автоколебательная система СВЧ питания



Энергия инъекции	48 кэВ
Прирост энергии/оборот	4.8 МэВ
Число орбит	14
Энергия на выходе	14.8 - 68.3 МэВ
Ток пучка	40 - 5 мА
Кратность	$1\lambda/\text{орбиту}$
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Уровень поля	0.963 Т
Размеры	2.2x1.8x0.9 м <sup>3</sup>

# 1992-2004. Сотрудничество с World Physics Technologies (США)

## Ускоритель с большой яркостью пучка на энергию 35 МэВ

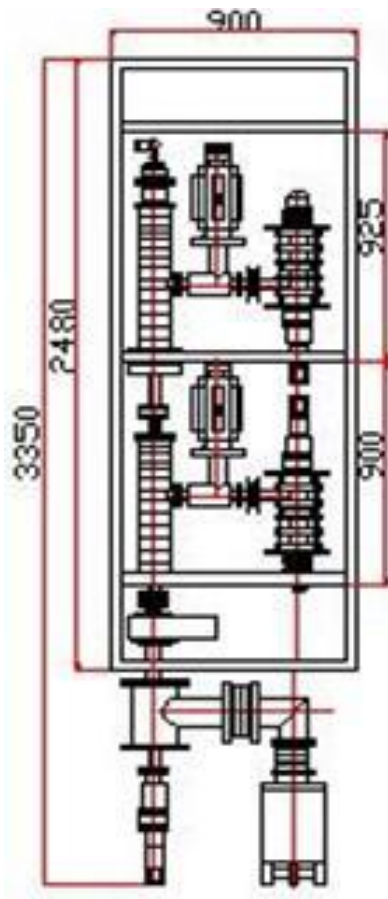


Энергия инжекции	4.85 МэВ
Прирост энергии	2.43 МэВ
Энергия на выходе	4.85-34.2 МэВ
Нормализованный эмиттанс	10 мм мрад
Продольный эмиттанс	200 кэВ град
Длительность сгустка	5 пс
Частота повторения	1-150 Гц
Заряд сгустка	150 пК
Рабочая частота	2,856 МГц
Импульсная СВЧ мощность	<3 МВт
Поле магнитов	0.486 Т

- инжекция высокоэнергетичных сгустков от СВЧ пушки и линейного ускорителя;
- поворотные магниты на основе редкоземельного магнитного материала;
- вакуумная камера с подавлением когерентного синхротронного излучения.

## 1992-2004. Сотрудничество с World Physics Technologies (США)

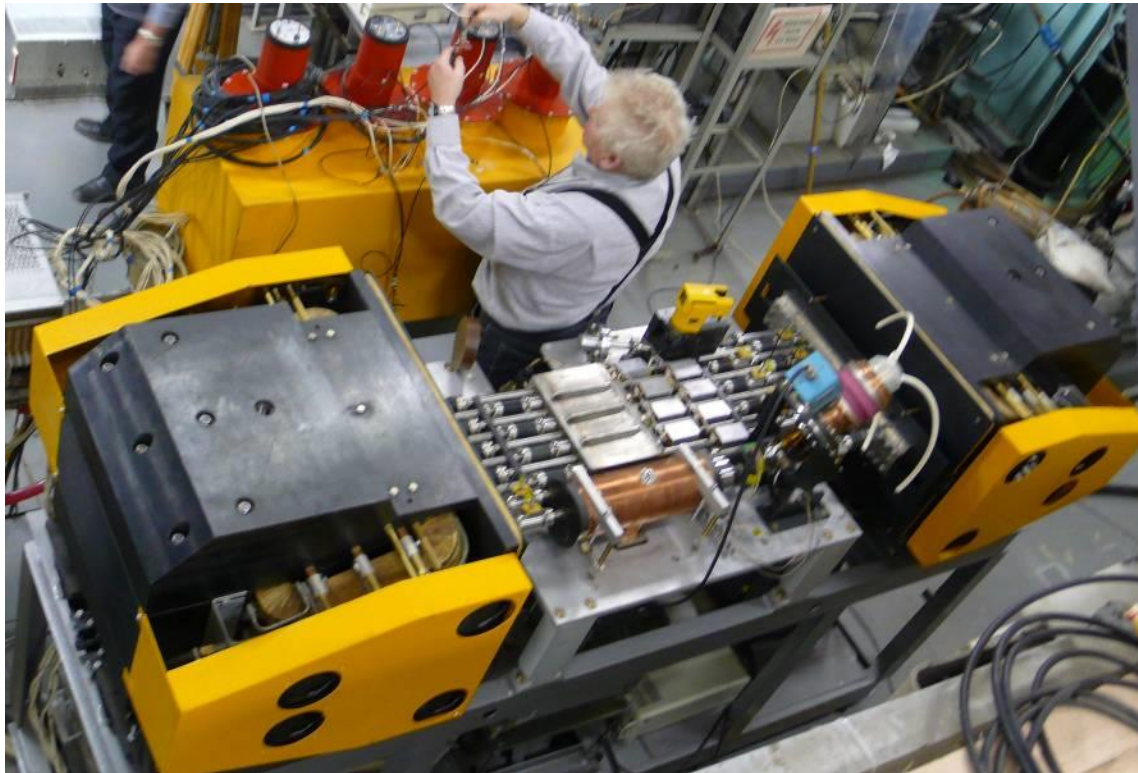
Компактный линейный ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1.2 МэВ и мощность пучка 60 кВт



Энергия пучка	1.2 МэВ
Ток пучка	0 - 50 мА
Максимальная мощность	60 кВт
Напряжение питания клистрона и пушки	15 кВ
Рабочая частота	2450 МГц
Мощность клистрона	50 кВт
Потребляемая мощность	~150 кВт
КПД	~40%

# 2004 – 2011. Сотрудничество с ФИАН и Valley Forge Composite Technologies (США).

## Импульсный разрезной микротрон на энергию 55 МэВ



Энергия инжекции	50 кэВ
Прирост энергии/оборот	5 МэВ
Число орбит	10
Энергия на выходе	55.6 МэВ
Ток пучка	20 мА
Кратность	1 $\lambda$ /орбиту
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Уровень поля	1.0 Т
Размеры	2.5x1.8x0.9 м <sup>3</sup>

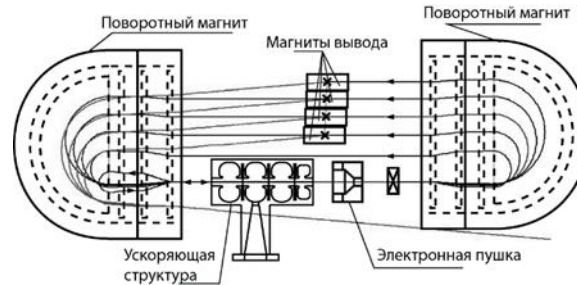
Ядерная физика.  
Детектирование взрывчатых веществ.  
Наработка ПЭТ изотопов.  
Активационный анализ.

# 2005 – 2012. Сотрудничество с Политехническим университетом Каталонии

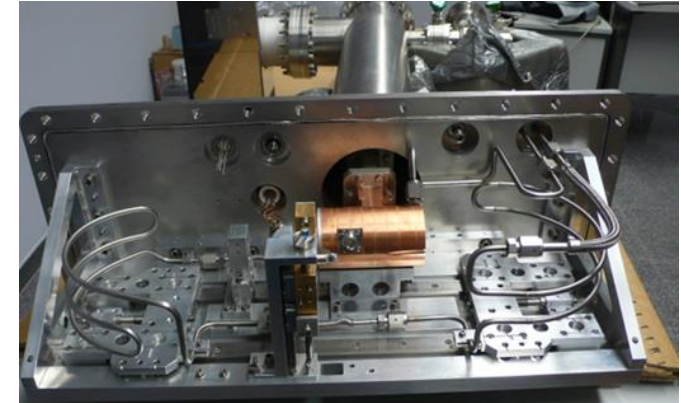
## Проект ускорителя электронов для интраоперационной лучевой терапии

- Основные характеристики:
- ✓ Энергии пучка: 6, 8, 10, 12 МэВ
- ✓ Ток пучка: ~10 нА – 10 мА
- ✓ Рабочая длина волны: 5 см
- ✓ СВЧ мощность: ~800 кВт
- ✓ Мощность дозы: 10-30 Гр/мин
- ✓ Ускоряющее устройство: 50 x 20 x 11 см
- Размеры: 50 x 20 x 11 см

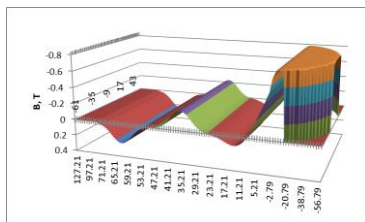
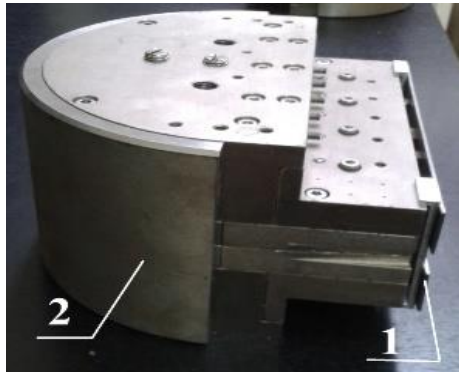
Схема разрезного микротрона



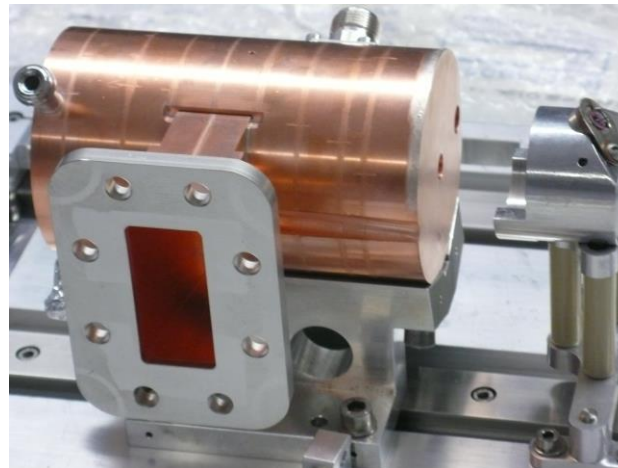
Сборка разрезного микротрона



## Изготовление и настройка магнитов



Ускоряющая структура

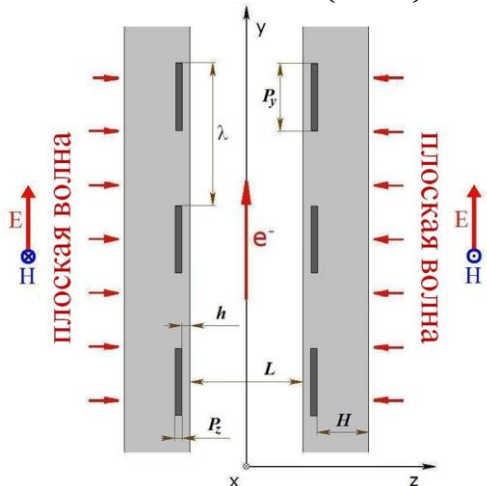


Электронная пушка

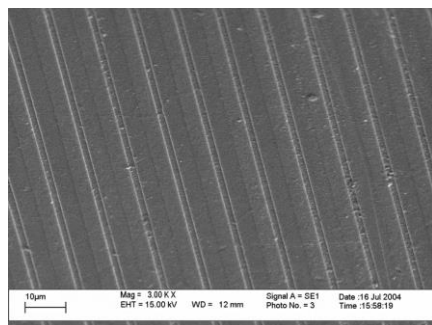


# 1998 – 2005. Лазерное ускорение в вакууме в ближней зоне

$$E_y(x, y, z, t) = E_{z0} \frac{2\pi y}{\lambda} \sin\left(2\pi \frac{z}{\lambda}\right) \sin \omega t$$



Дифракционная ускоряющая структура



Дифракционная решетка на 10.6 мкм

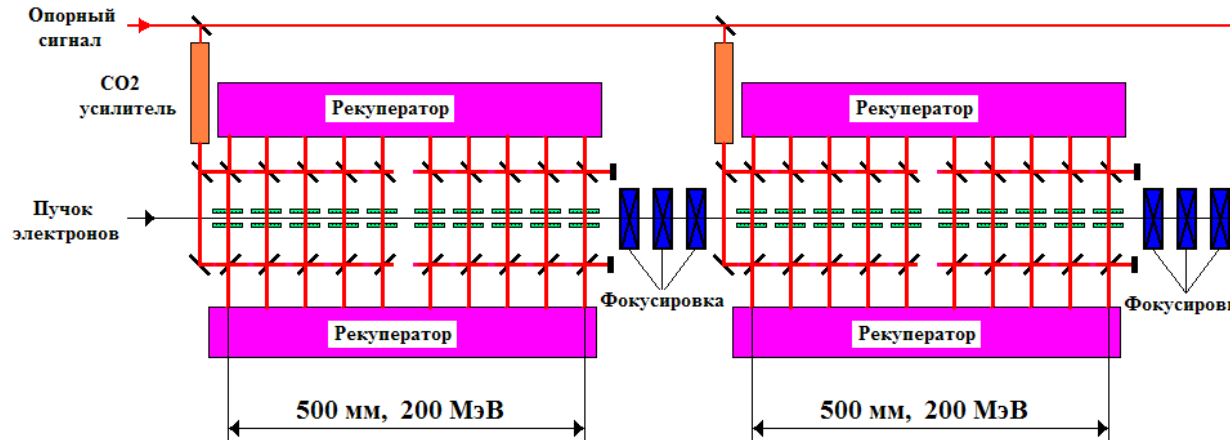


Схема ускорителя

## Параметры ускорителя на 10 ГэВ

Энергия ускорителя	10 ГэВ
Количество секций в суперсекции	80
Длина секции	3 мм
Прирост энергии в суперсекции	200 МэВ
Длина суперсекции	0,5 м
Импульсная мощность на суперсекцию	1,44 ТВт
Количество суперсекций	50
Полная длина ускорителя	30 м
Длительность импульса	10 пс
Полная импульсная мощность	72 ТВт
Полная энергия импульса	720 Дж
Импульсная мощность пучка	0,16 ТВт



СО<sub>2</sub> лазер, 10.6 мкм, 1 Дж



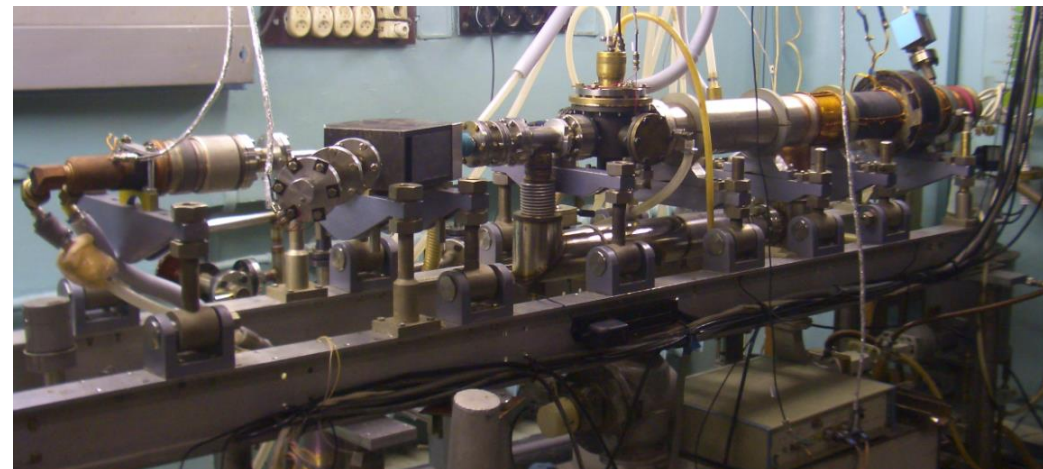
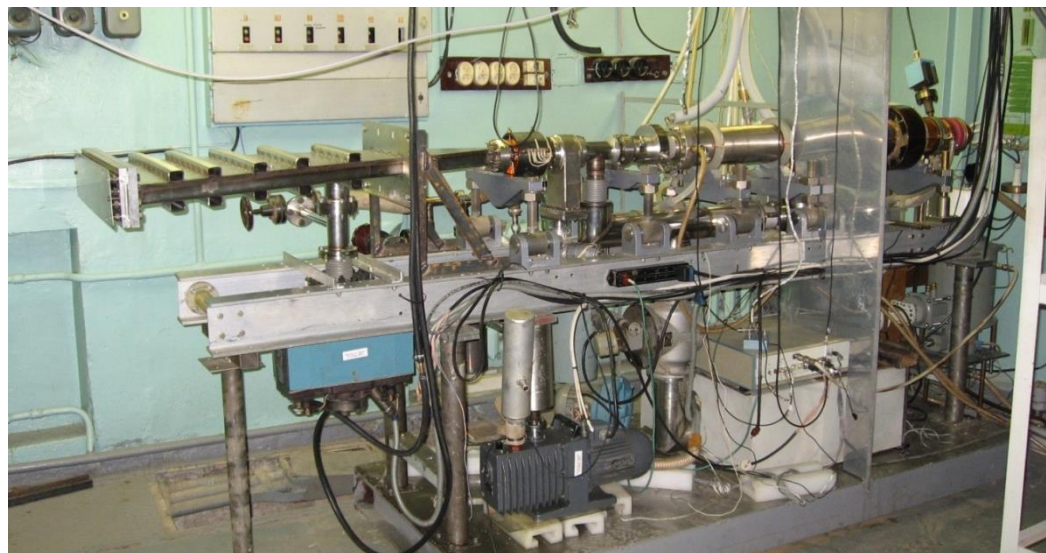
Измерения прототипа на 20 мм

## 2004 – 2005. Сотрудничество с ФГУП «НПП «Торий» по теме «Станция»

### Прототип линейного ускорителя для радиационных технологий на энергию 10 МэВ

#### Параметры:

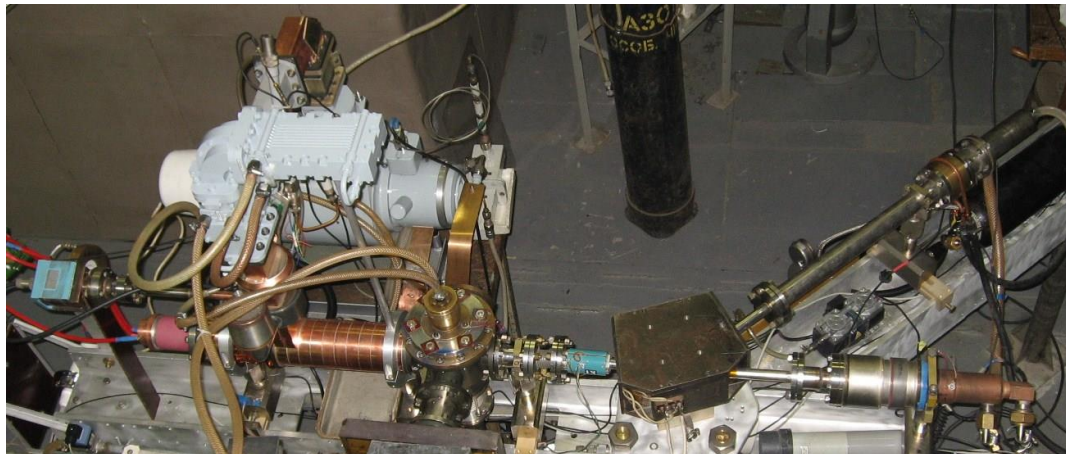
Энергия пучка	10 МэВ
Импульсный ток	430 мА
Средняя мощность пучка	15 кВт
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	25 кВт
Полный КПД	20%



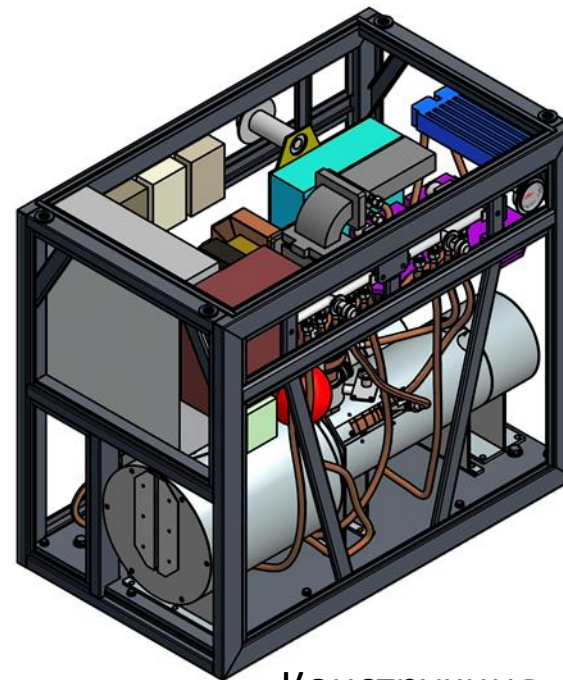


## 2007 – 2009. Сотрудничество с ФГУП «НПП «Торий» по теме ИДК

Прототип линейного ускорителя с поимпульсным переключением энергии для стационарного инспекционно-досмотрового комплекса по заказу компании Smiths Detection (США, Германия, Франция).



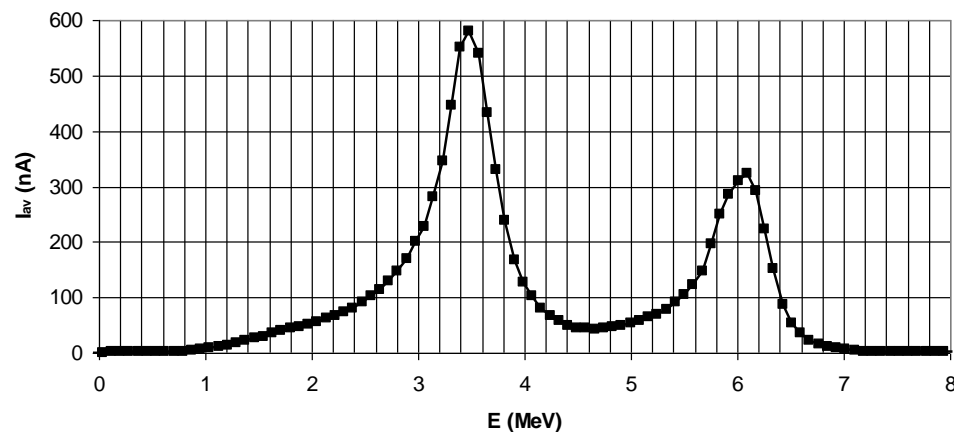
Стенд для испытаний ускоряющей системы



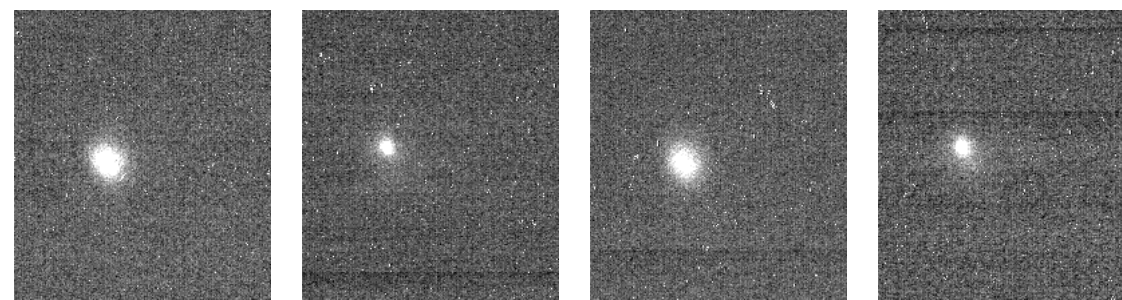
Конструкция



Излучатель в сборе

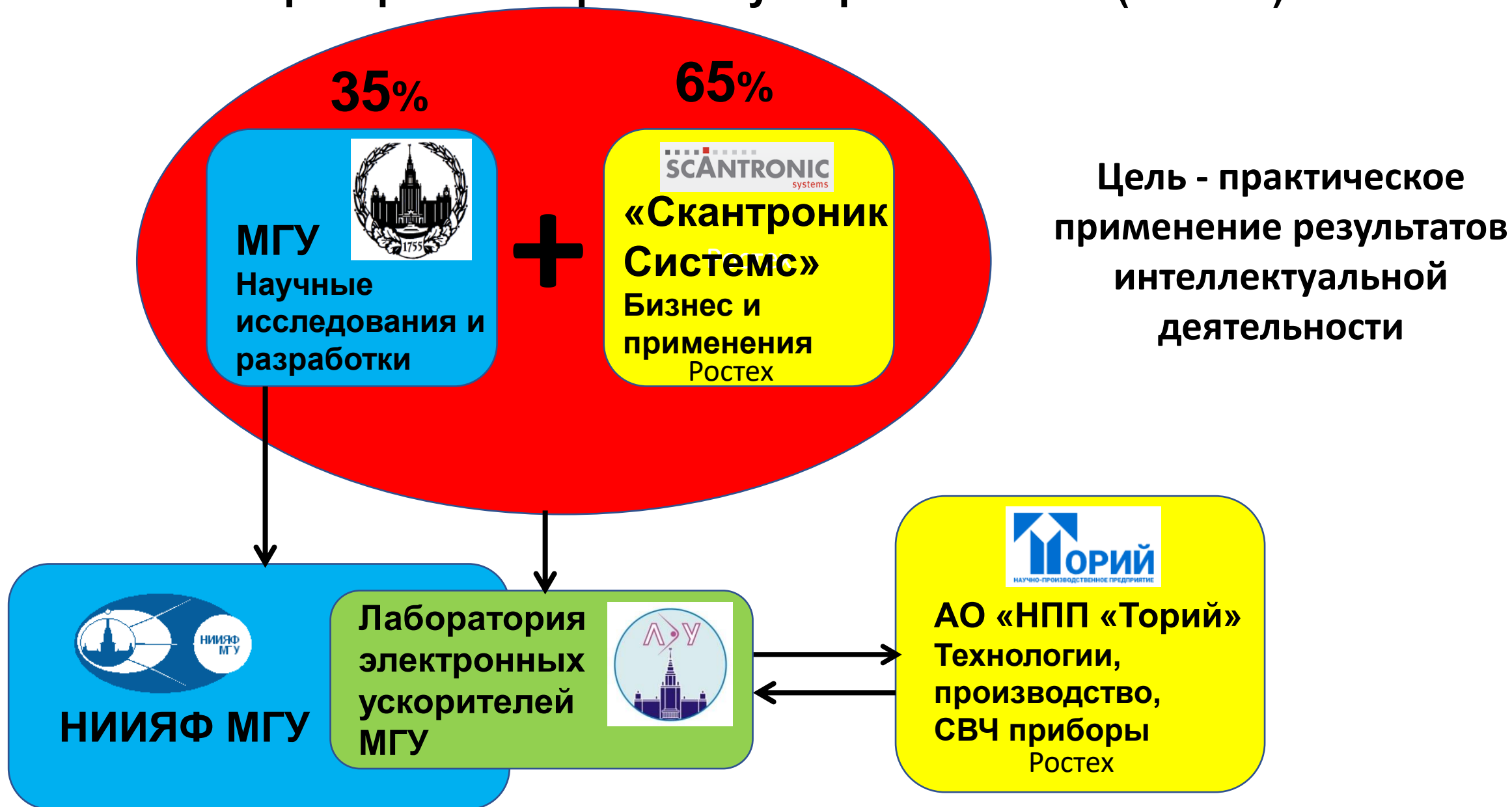


Спектр энергии



Изображения пучка

# В июне 2013 г. на базе ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ создана Лаборатория электронных ускорителей МГУ (ФЗ 217)



# Некоторые применения электронных ускорителей

<b>Применение</b>	<b>Область энергий</b>	<b>Важные параметры</b>	<b>Количество</b>
Фундаментальные исследования	5 МэВ – 140 ГэВ → 500 ГэВ → → 3 ТэВ → .....	Энергия, светимость, яркость, скважность, монохроматичность и др.	~ 100
Источники синхротронного излучения	0.3 – 8 ГэВ	Накопленный ток, время жизни пучка, яркость, спектр излучения	~70
Медицина: лучевая терапия, производство изотопов	4 МэВ – 50 МэВ	Надежность, контроль радиационного поля	~9000
Технологические процессы в промышленности	0.1 МэВ – 10 МэВ	Надежность, средняя мощность, эффективность	~1000 - 2000
Стерилизация, дезинсекция, очистка воды, и т.п.	5 МэВ – 10 МэВ	Надежность, средняя мощность, эффективность	~200-300
Досмотровые комплексы, дефектоскопия	2.5 МэВ– 10 МэВ	Надежность, параметры радиационного поля	~500

**К настоящему времени ЛЭУ МГУ разработала и совместно с АО «НПП «Торий» поставила заказчикам следующие электронные ускорители:**

- Радиография	9
- Стационарные ИДК	12
- Мобильные ИДК	15
- Железнодорожные ИДК	4
- Стерилизация	2
- Медицина	1

---

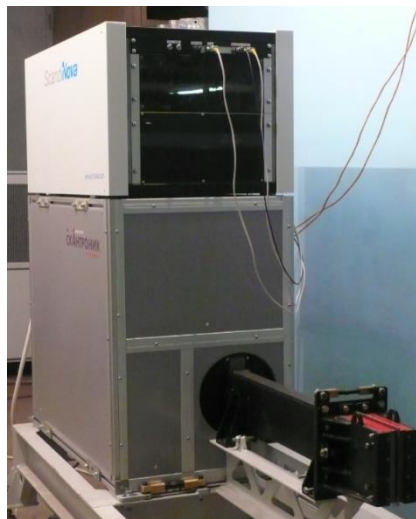
**Всего: 43**

# Работа ускорителей для радиографии на предприятиях Росатома



Предприятия: «Петрозаводскмаш» (1+1), «ЗиО» Подольск (2),  
«Атоммаш» Волгодонск (5), «Полесье» Волгодонск(1)

# Электронные ускорители с поимпульсным переключением энергии для инспекционно-досмотровых комплексов



Стационарный



Мобильный



Железнодорожный

КИУ-168



КИУ-271



Энергия  
Стабильность энергии  
Мощность дозы, до  
Частота следования имп., до

3.5/6 МэВ  
0.3%  
10 Гр/мин  
2 kHz

Клистроны и ускоряющие системы для 10 - см и 5 см - диапазонов

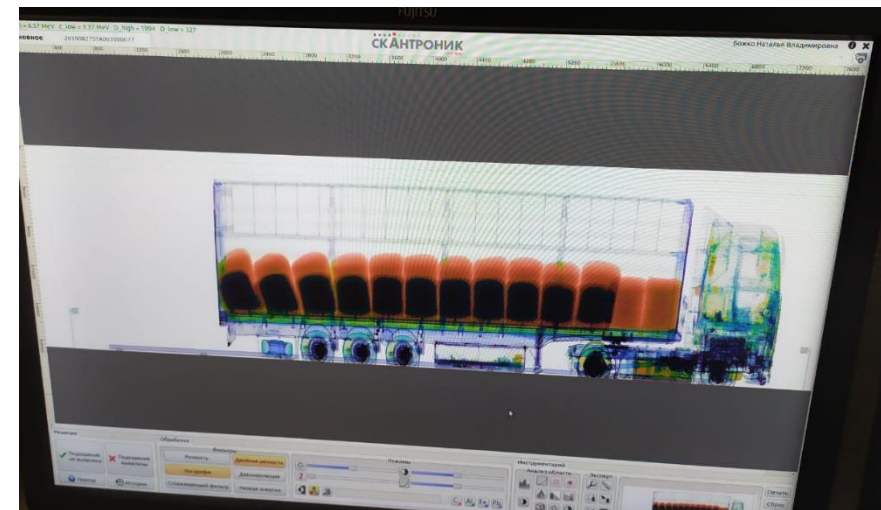
# Стационарный ИДК СТ-6035 «Скантроник Системс»



Система сканирования



Ускоритель



Изображение объекта

[http://www.scantronicsystems.com/st6035\\_ru/](http://www.scantronicsystems.com/st6035_ru/)

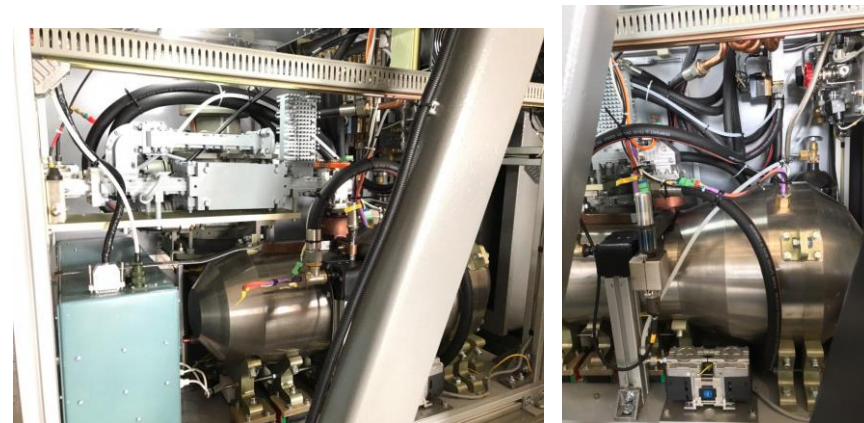
# Мобильные ИДК СТ-2630М «Скантроник Системс»



Опытная эксплуатация силами ФТС 13 комплексов на пограничных пунктах пропуска с 2018 г.



# Презентация нового варианта мобильного ИДК «Скантроник Системс», 2020 г.



Внутри ускорителя

<https://rostec.ru/news/rostekh-predstavil-novyy-inspeksionno-dosmotrovyy-kompleks-na-shassi-kamaz/>

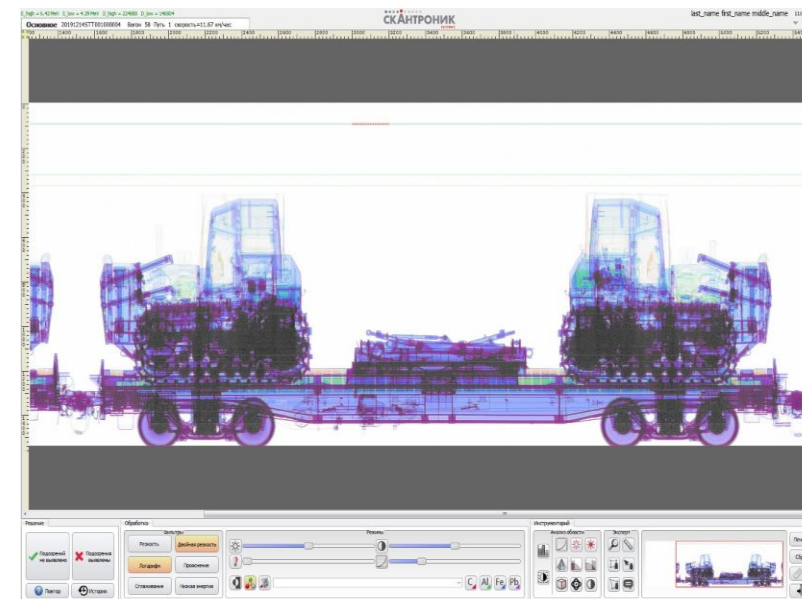
# Железнодорожный ИДК СТ-2630Т «Скантроник Системс»



Двухпутевой ж-д ИДК



Ускоритель



Изображение

[http://www.scantronicsystems.com/st2630t\\_ru/](http://www.scantronicsystems.com/st2630t_ru/)

## Импульсный линейный ускоритель на энергию 10 МэВ



Ускоряющая система



Клистрон и модулятор



Система контроля и источники питания

Главной особенностью ускорителя является возможность варьирования параметра выходного пучка в широких пределах в зависимости от обрабатываемого продукта, что обеспечивает высокую эффективность использования мощности пучка, возможность работы с низкими и высокими дозами, сообщаемыми продукту. Параметры работы ускорителя устанавливаются автоматически в соответствии со спецификацией продукта.

Энергия пучка	5 - 10 МэВ
Импульсный ток	430 мА
Длительность импульса	4 – 12 мкс
Частота следования имп.	50 – 400 Гц
Средняя мощность пучка	1 - 15 кВт
Рабочая частота	2856 МГц
Длина структуры	1.24 м
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Средняя мощность клистрона	25 кВт
КПД от розетки	20%
Ширина сканирования	40 - 80 см
Частота сканирования	1 – 30 Гц

# Центр антимикробной обработки продукции компании Теклеор (Калужская область)



**Оборудование ускорителя**



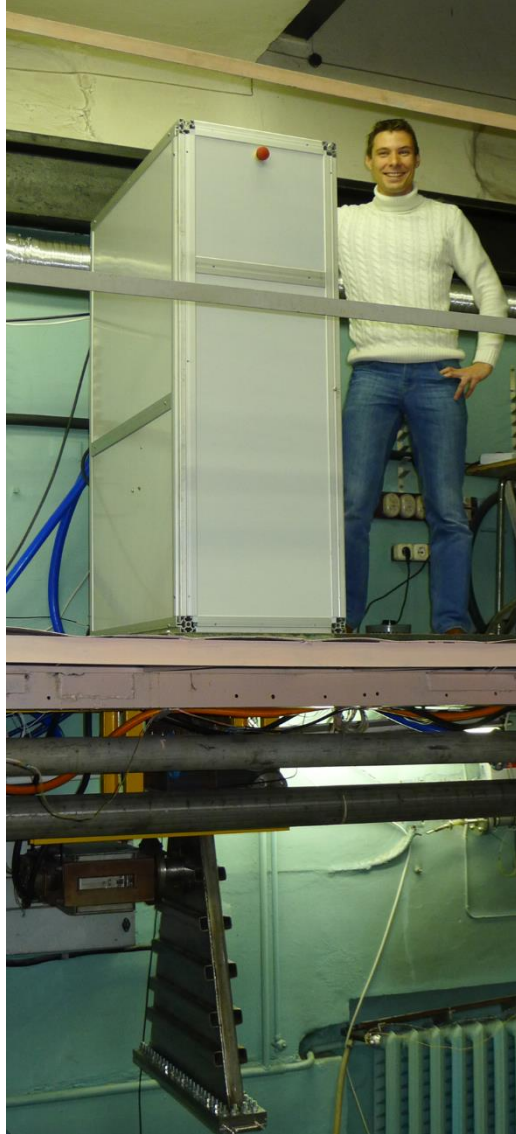
**Здание центра**



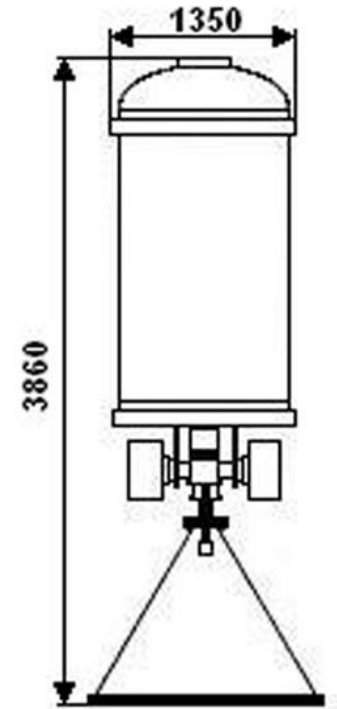
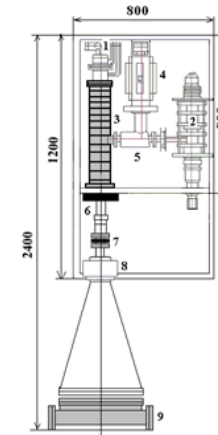
**Академик Ю.В. Гуляев и губернатор Калужской области А.Д. Артамонов на открытии центра, сентябрь 2017 г.**

<https://www.tecleor.com/en/>

# Ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1 МэВ



Сравнение с ускорителем прямого действия



Энергия пучка	1 MeV
Средний ток пучка, max	25 mA
Средняя мощность пучка, max	25 kW
Рабочая частота	2450 MHz
Средняя мощность клистрона	50 kW
КПД от розетки	30%
Ширина развертки	80 cm
Размеры ускорителя	470 x 784 x 1375 mm <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Без развертки и источника питания

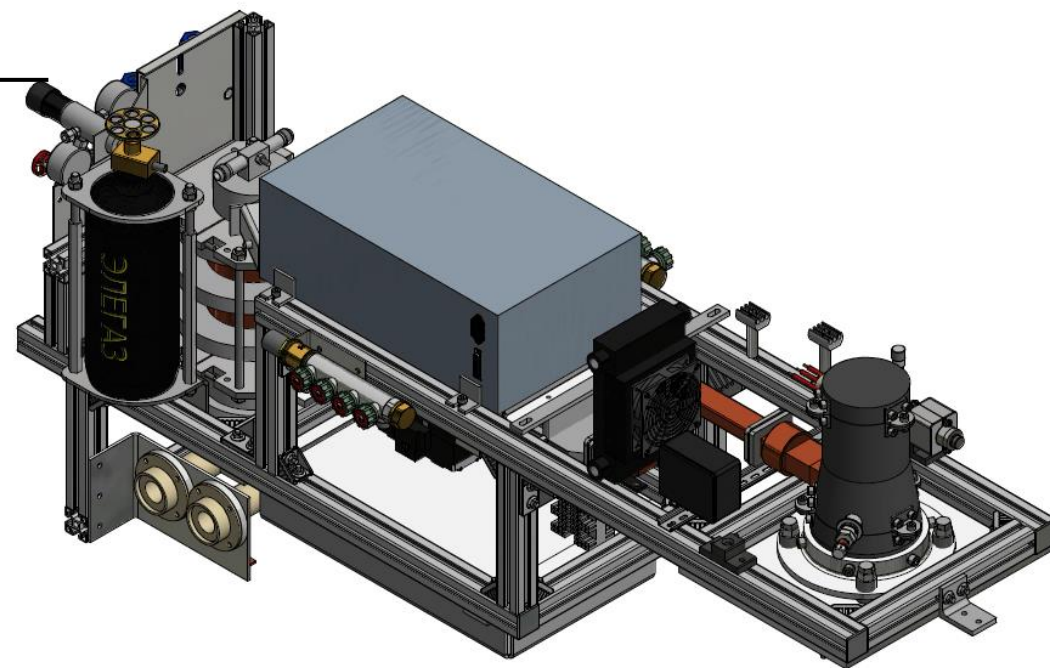
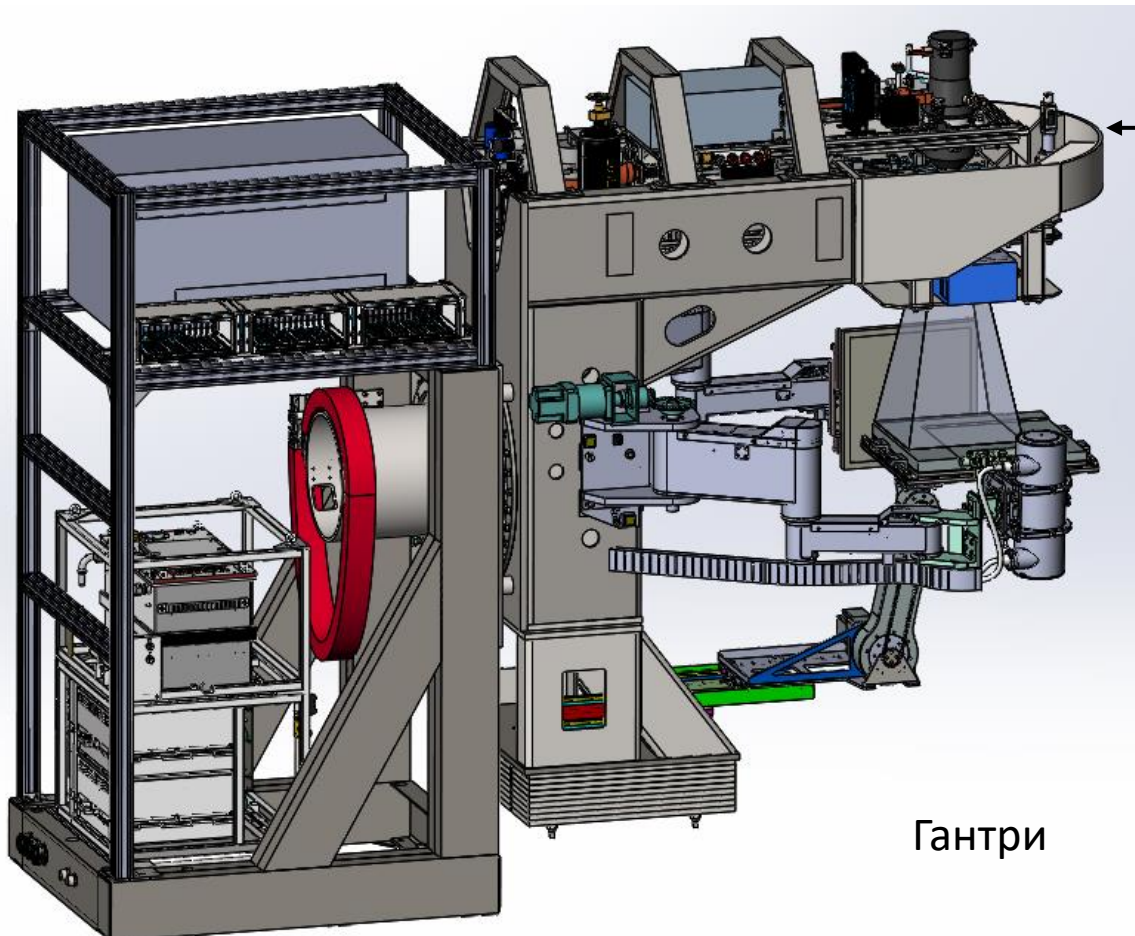
# Комплекс лучевой терапии КЛТ 6 (Оникс)

Разработку линейного ускорителя провела ЛЭУ МГУ по контракту с НИИТФА

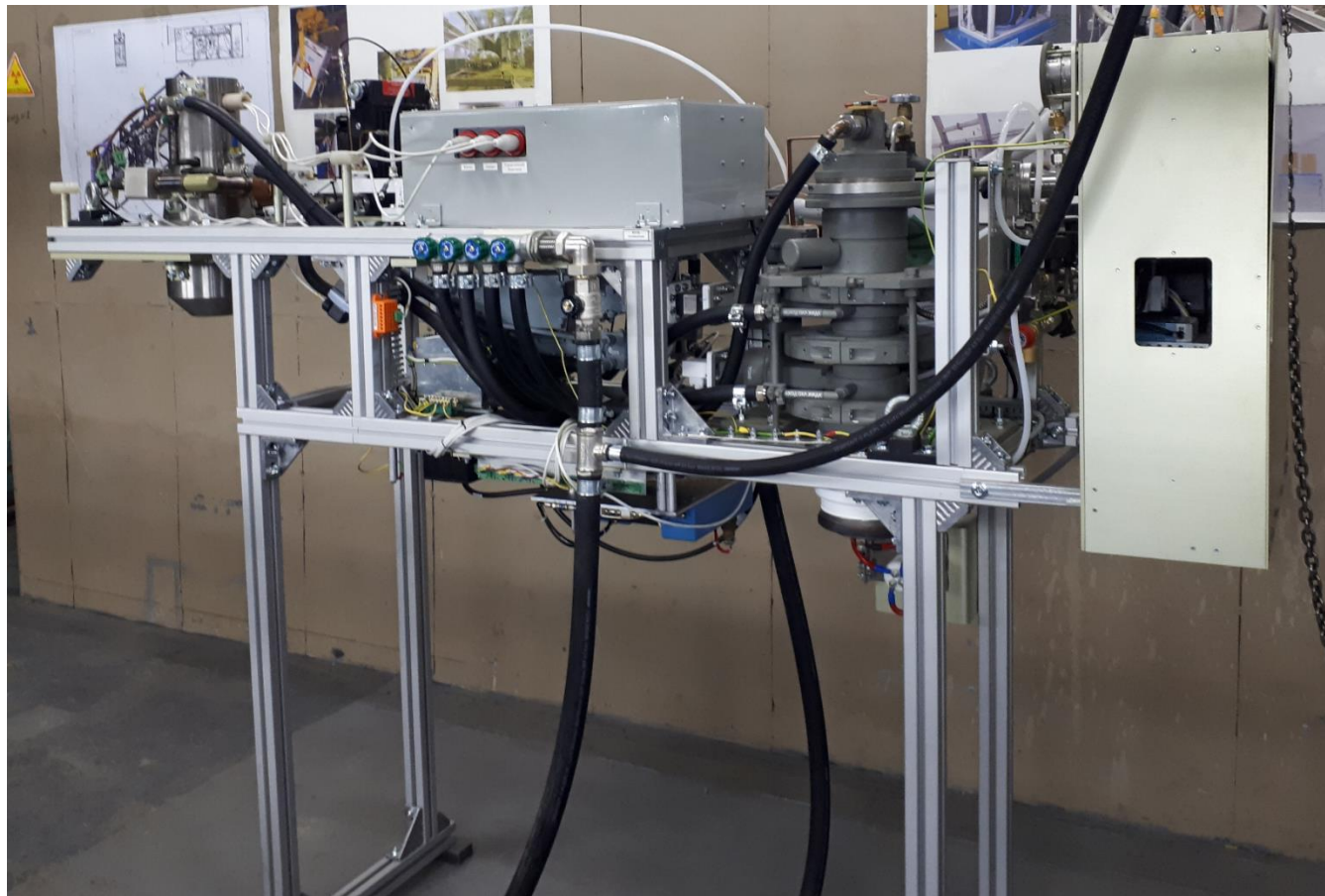
Параметры ускорителя

Энергия пучка  
Мощность дозы

2.5/6 МэВ  
10 Гр/мин

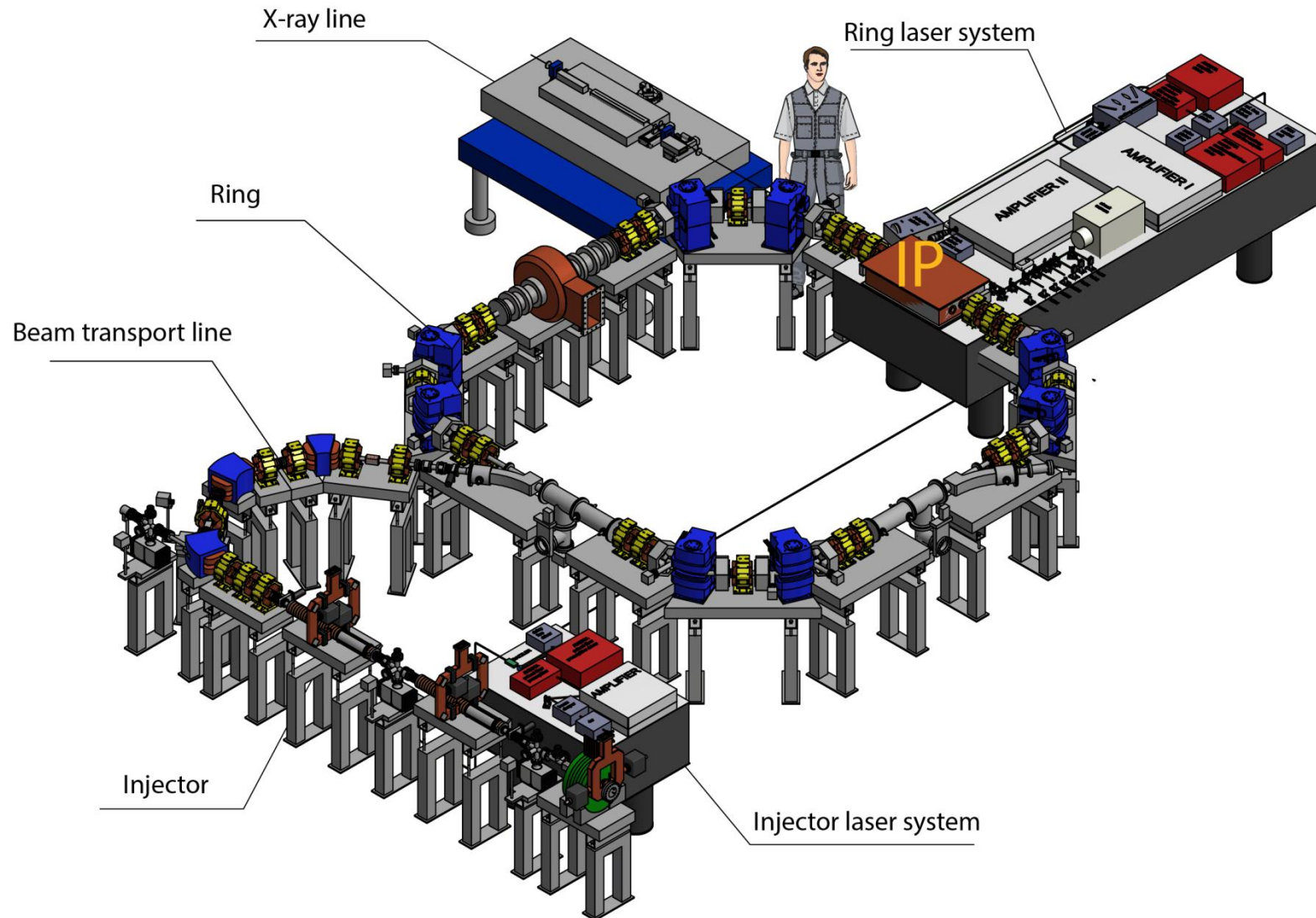


## Ускоритель для комплекса лучевой терапии КЛТ 6



Испытательный стенд

# Проект лазерно-электронного генератора рентгеновского излучения





## **Заключение**

За 35 лет исследований в области ускорителей заряженных частиц в НИИЯФ МГУ пройден путь от разработок больших ускорительных комплексов для фундаментальных исследований, проведения поисковых работ в области физики ускорителей, до создания и выпуска прикладных ускорителей для систем безопасности, промышленности и медицины.

Опыт, аккумулированный в институте, позволяет разрабатывать образцы ускорителей, превосходящие по своим характеристикам известные аналоги.

Парк ускорителей электронов, созданный в НИИЯФ МГУ, позволяет проводить широкий круг исследований в области ядерной физики и радиационных технологий.