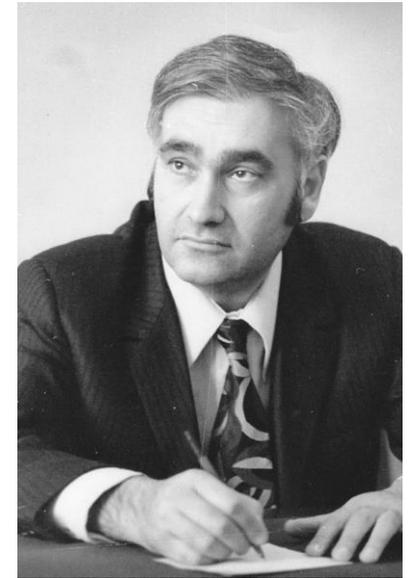


# Создание и развитие ускорительной тематики в ОЭПВАЯ

Памяти Бориса Саркисовича Ишханова

В.И. Шведунов  
1 декабря 2020 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** – разработка **лабораторных образцов** ускорителей электронов прикладного назначения в сотрудничестве с зарубежными и российскими организациями.
- 4. 2012 – по н/в** – разработка и создание **промышленных образцов** ускорителей прикладного назначения.

**1. 1982 – 1985** – поиск путей дальнейшего развития научных исследований в отделе, физическое обоснование необходимости создания ускорителя электронов непрерывного действия.

## Преимущества и недостатки бетатрона

Бетатрон 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.



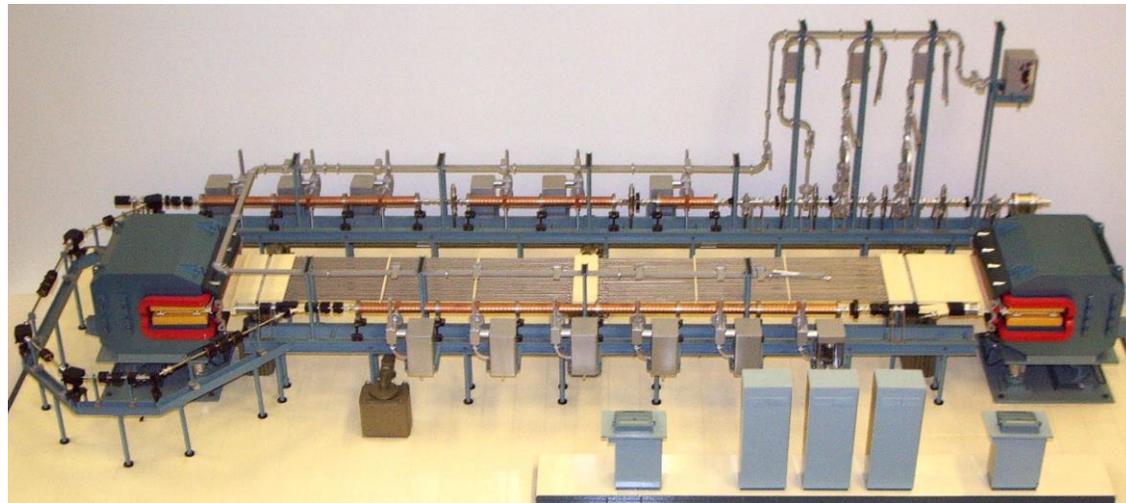
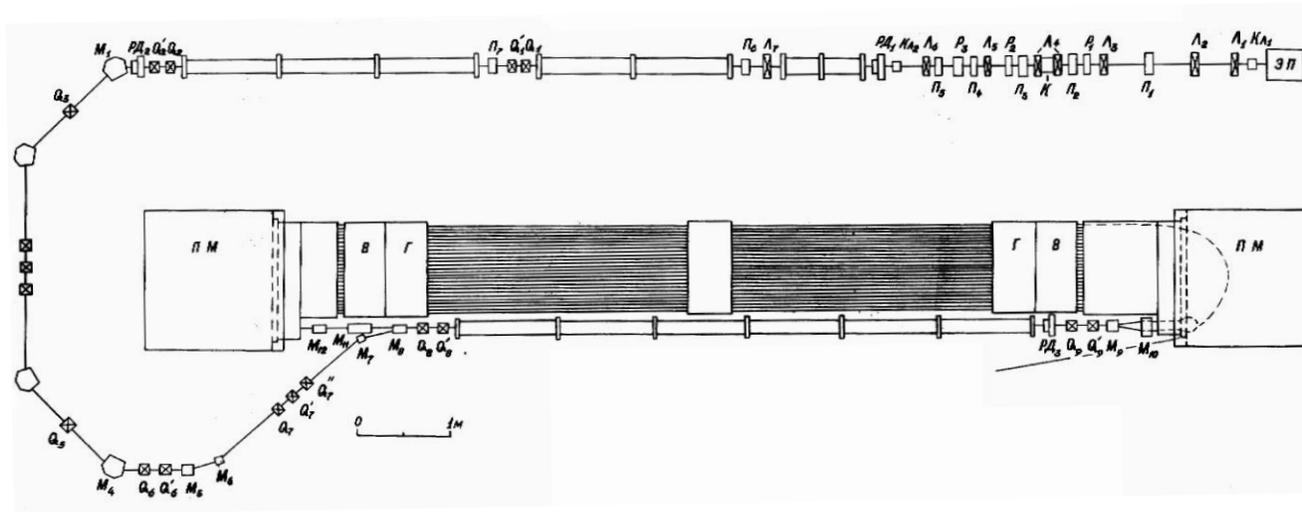
Бетатрон НИИЯФ МГУ



На XXIX Совещании по ядерной спектроскопии. Рига, у здания Академии наук Латвийской ССР, 1979 г.

**2. 1985 – 1992** – разработка и реализация проекта разрезного микротрона непрерывного действия для фундаментальных исследований.

# Схема и макет разрезного микротрона

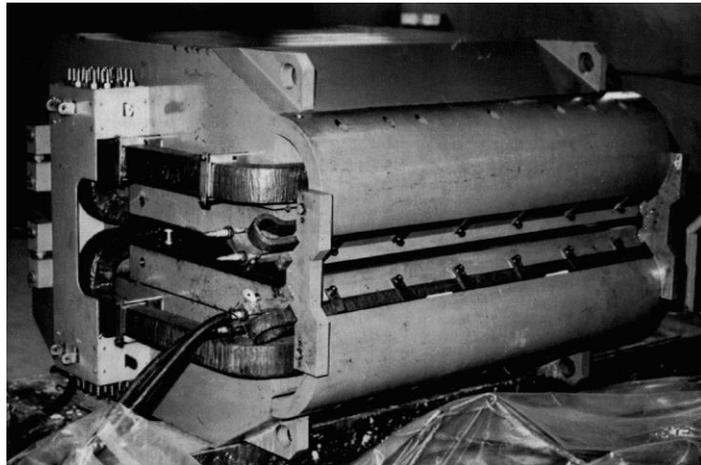
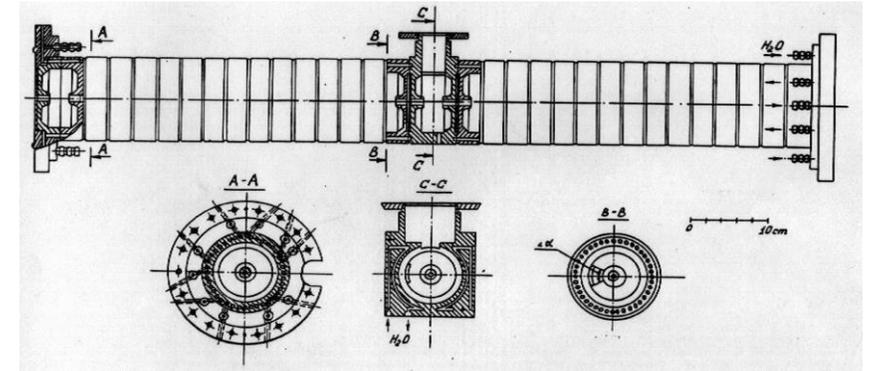
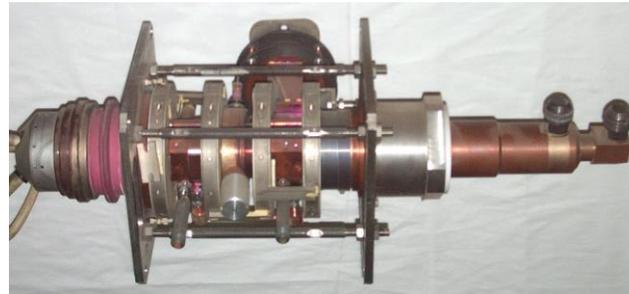
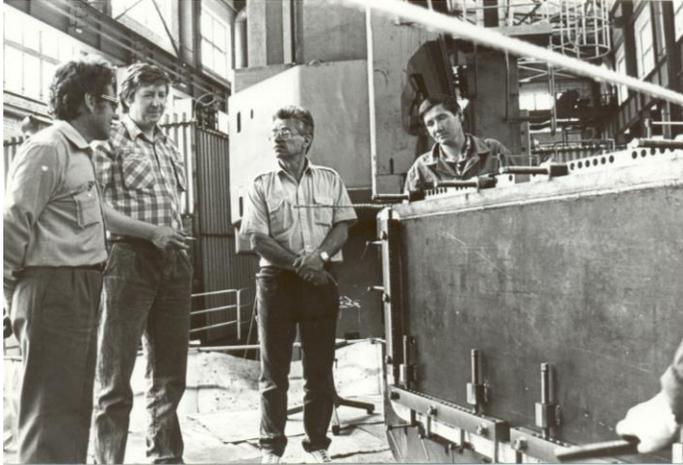


Энергия инжекции	6 МэВ
Прирост энергии	6 МэВ
Максимальная энергия	175 МэВ
Средний ток пучка	100 мкА
Рабочая частота	2450 МГц
Поле магнитов	1.027 Т
Мощность клистронов	22 кВт
Число клистронов	12+1

## Организация Б.С. Ишхановым работ по реализации проекта

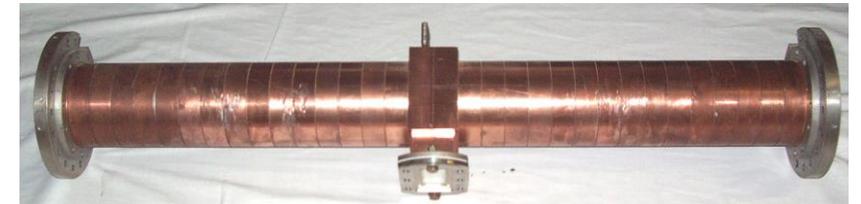
- В 1985 г. принято решение Ученого совета НИИЯФ МГУ о реализации проекта.
- К работам привлечена большая часть сотрудников отдела, студенты, аспиранты и сотрудники кафедры ускорителей и других кафедр физического факультета, различные службы института (механические мастерские НИИЯФ МГУ и физического 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



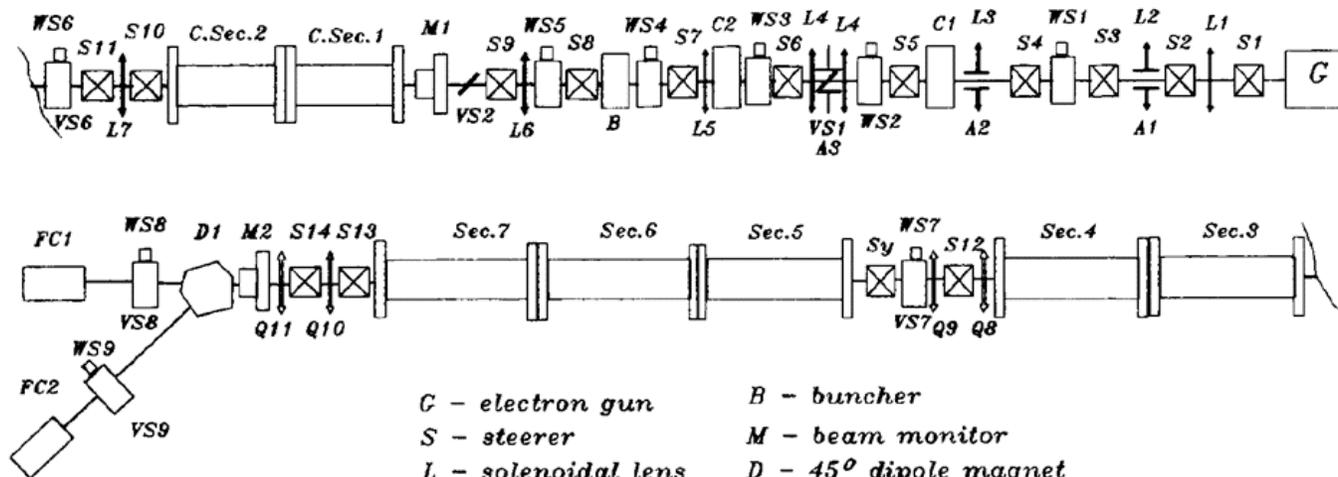
**Поворотный магнит**  
**Магнитное поле** 1.03 Т  
**Вес магнита** 18 т

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



**Ускоряющая структура на стоячей волне**  
**Рабочая частота** 2450 МГц  
**Эффективное шунтовое сопротивление** 76 МОм/м  
**Темп набора энергии** 1 МэВ/м

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



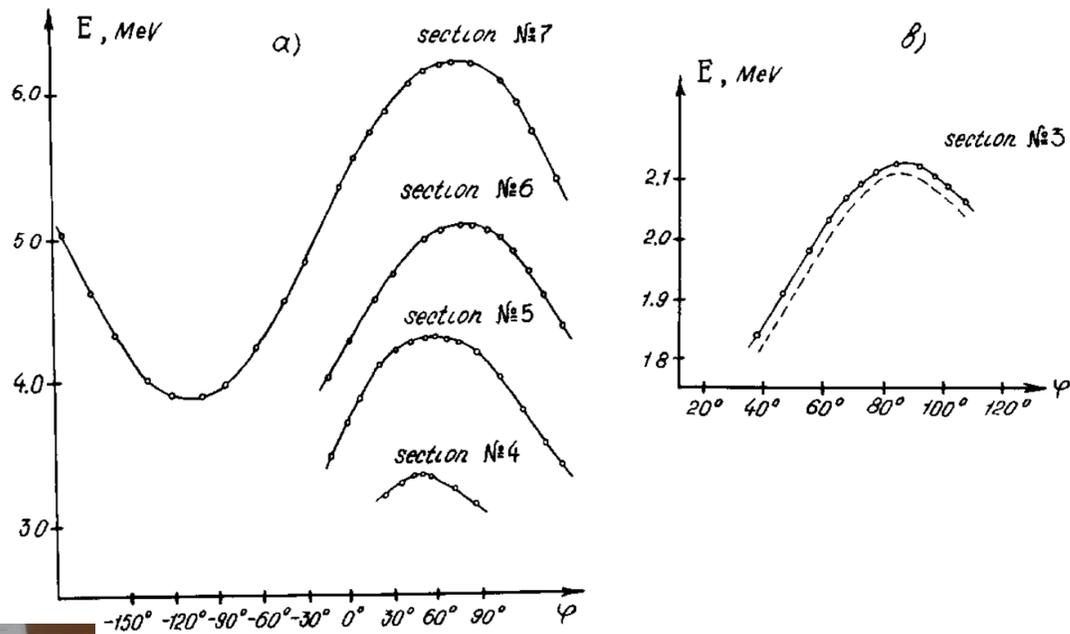
- |                            |                                    |
|----------------------------|------------------------------------|
| <i>G</i> - electron gun    | <i>B</i> - buncher                 |
| <i>S</i> - steerer         | <i>M</i> - beam monitor            |
| <i>L</i> - solenoidal lens | <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.

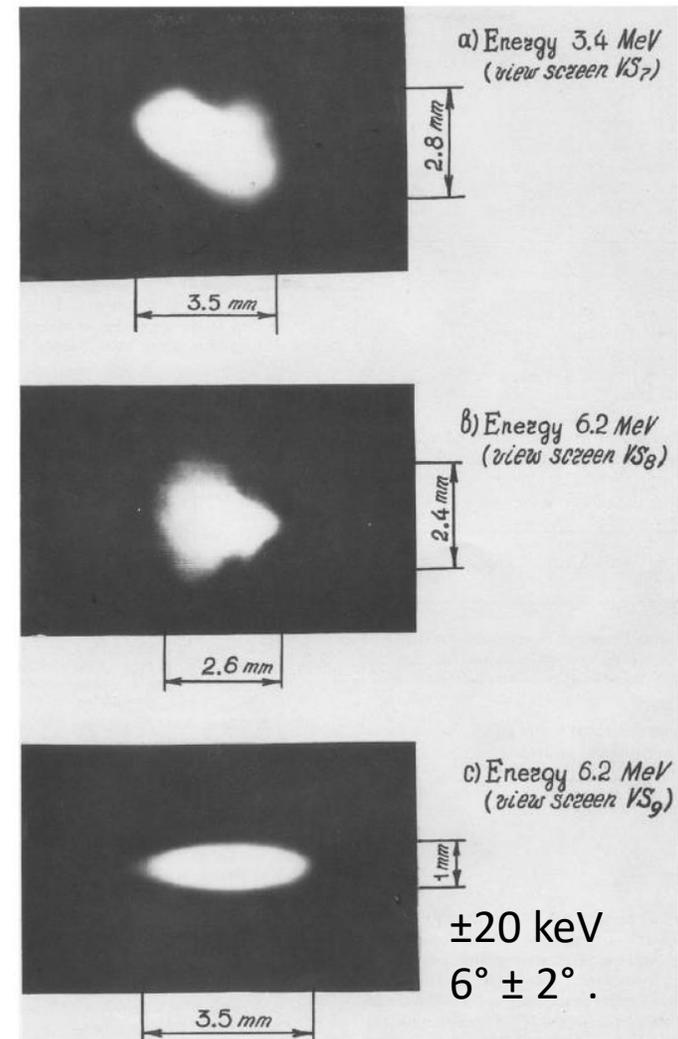
Максимальная энергия пучка	6.2 MeV
Максимальный средний ток пучка	1 mA
Монохроматичность	±0.3%
Длина сгустка	4 ps
Нормализованный эмиттанс	5 mm*mrad
Длина ускорителя	12 m
Потребляемая мощность	400 kW

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

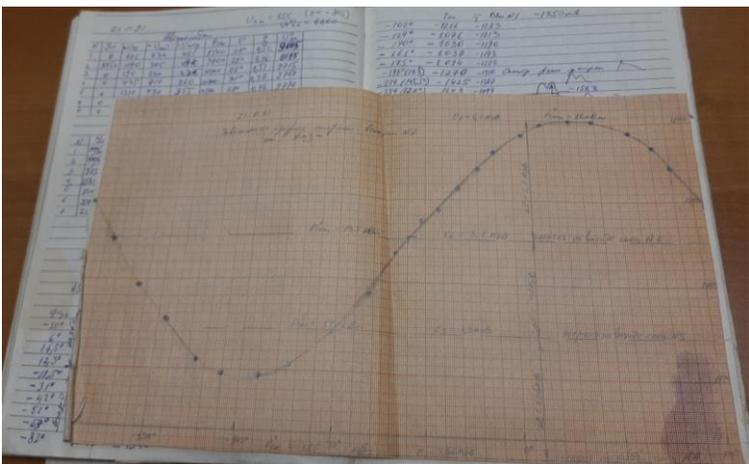
В 1992 г. инжектор электронов разрезного микротрона был введен в действие, на нем были выполнены эксперименты по неупругому рассеянию фотонов ядрами и по взаимодействию электронного пучка с кристаллами.



Зависимость энергии на выходе секций от фазы поля.  
NIM A326 (1993) 391-398



Изображения пучка

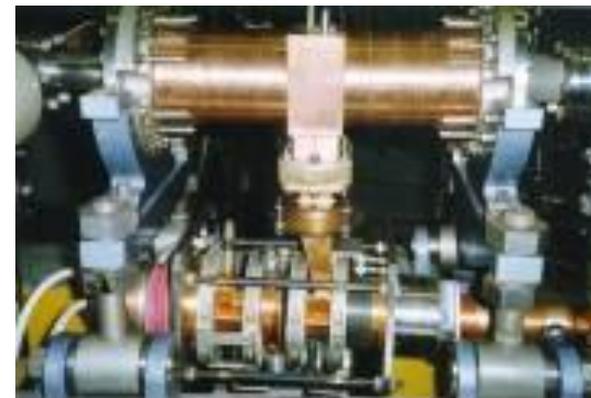
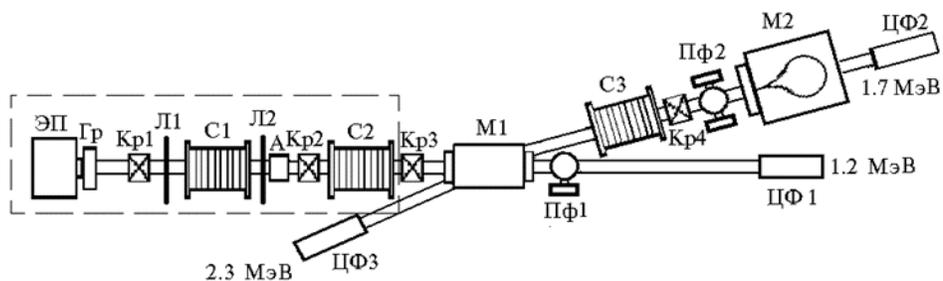


Измерения 21.11.1991 в присутствии Б.С. Ишханова

**3. 1992 – 2012** – разработка лабораторных образцов ускорителей электронов прикладного назначения в сотрудничестве с зарубежными и российскими организациями.

## Попытки самостоятельно выжить в начале 90-х

- производство мощных СВЧ циркуляторов;
- СВЧ печь мощностью 22 кВт;
- испытаны варианты прикладных линейных ускорителей непрерывного действия на энергию до 1 МэВ;
- ускоритель непрерывного действия на энергию 600 кэВ для обработки какао-порошка (Самара);
- ускоритель непрерывного действия с термоэмиссионной СВЧ пушкой;
- ускоритель непрерывного действия с магнитным зеркалом с тремя портами пучка;
- сверхпроводящий ускоритель (совместно с МРТИ, ОИЯИ, НИИЭФА, ФИАН и ИФВЭ).



Ускоритель непрерывного действия с магнитным зеркалом с тремя портами пучка.

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

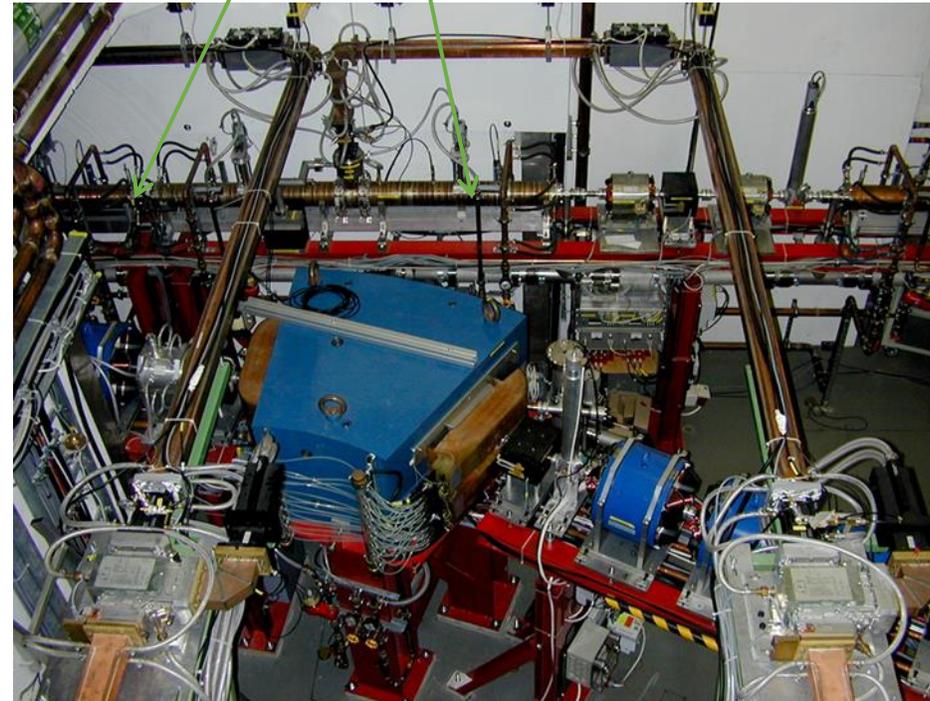
## Upgrade инжектора MAMI, участие в разработке и реализации проекта MAMI-C



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



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



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

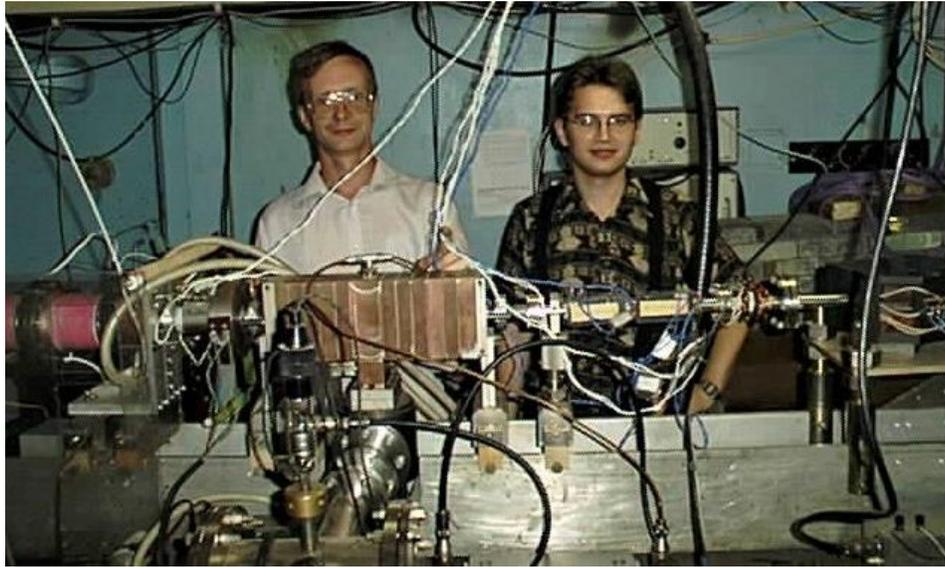
Детектирование взрывчатых веществ и наркотиков методами фотоядерных реакций (идея Luis Alvarez). В работах участвовали сотрудники:

ИФП, ФИАН, МИФИ, МРТИ, ИФВЭ, ИТЭФ, Саратовского гос. ун-та, WPT (США).

Созданы, не имеющие аналогов ускорители электронов:

- импульсный разрезной микротрон на энергию 70 МэВ на редкоземельных постоянных магнитах;
- импульсный разрезной микротрон на энергию 35 МэВ с инжектором на основе СВЧ пушки;
- ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1.2 МэВ, с мощностью пучка 60 кВт.

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



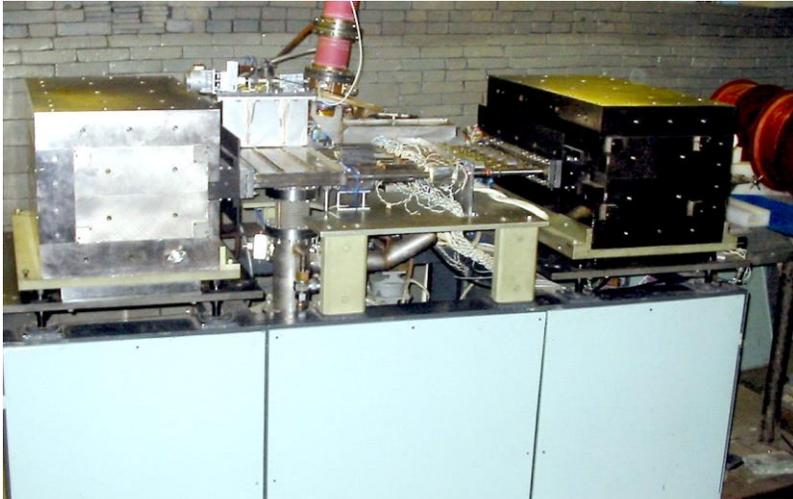
Стенд для испытаний ускоряющей структуры с высокочастотной квадрупольной фокусировкой для разрезного микротрона на энергию 70 МэВ – первый импульсный ускоритель электронов в НИИЯФ МГУ. 1999 г., Д.И. Ермаков, А.Н. Ермаков.



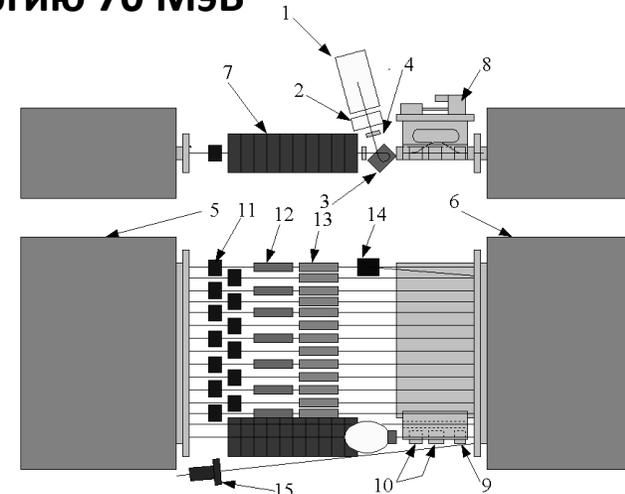
Обсуждение результатов испытаний бипериодической ускоряющей структуры с высокочастотной квадрупольной фокусировкой.

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

## Импульсный разрезной микротрон на энергию 70 МэВ



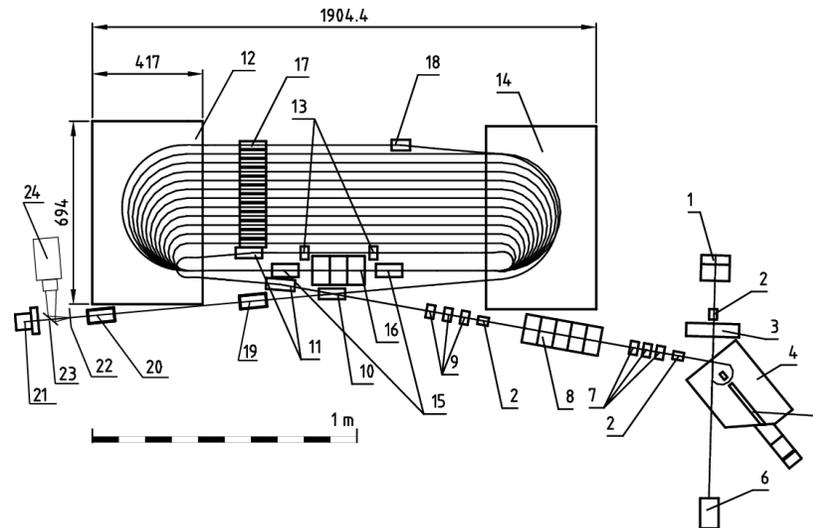
- Большие поворотные магниты с уровнем поля  $\sim 1$  Т на основе редкоземельных магнитов (РЗМ)
- Прямоугольная ускоряющая структура с высокочастотной квадрупольной фокусировкой
- Устройство регулирования длины первой орбиты
- Компактные квадрупольные триплеты на основе РЗМ
- Автоколебательная система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

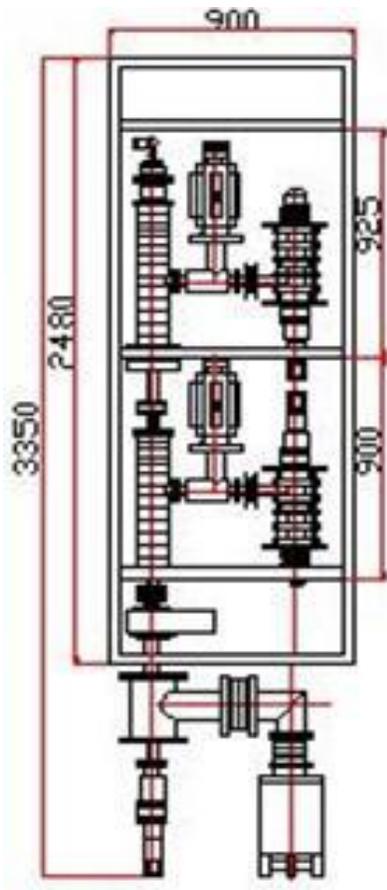


Энергия инжекции	4.85 МэВ
Прирост энергии	2.43 МэВ
Энергия на выходе	4.85-34.2 МэВ
Нормализованный эмиттанс	10 мм мрад
Продольный эмиттанс	200 кэВ град
Длительность сгустка	5 пс
Частота повторения	1-150 Гц
Заряд сгустка	150 пК
Рабочая частота	2,856 МГц
Импульсная СВЧ мощность	<3 МВт
Поле магнитов	0.486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

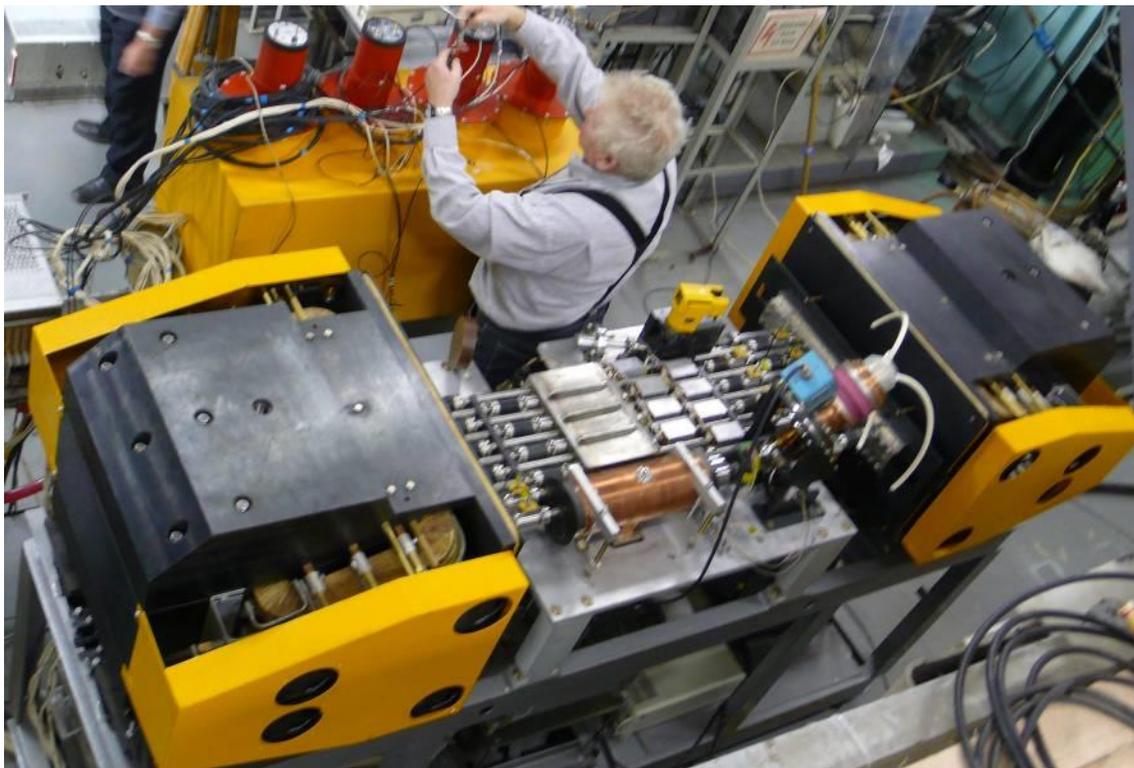
Компактный линейный ускоритель электронов непрерывного действия на энергию 1.2 МэВ и мощность пучка 60 кВт



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

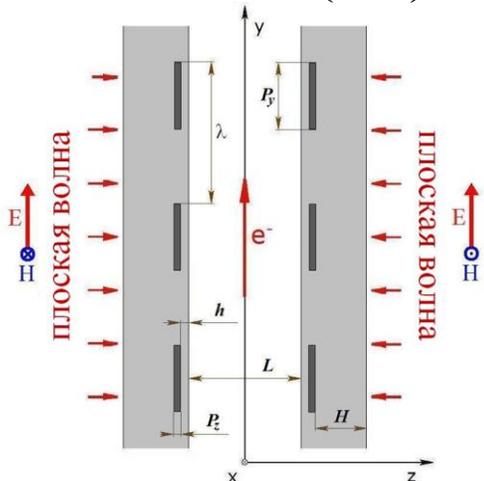


Энергия инжекции	50 кэВ
Прирост энергии/оборот	5 МэВ
Число орбит	10
Энергия на выходе	55.6 МэВ
Ток пучка	20 мА
Кратность	1 $\lambda$ /орбиту
Рабочая частота	2856 МГц
Импульсная мощность клистрона	6 МВт
Уровень поля	1.0 Т
Размеры	2.5x1.8x0.9 м <sup>3</sup>

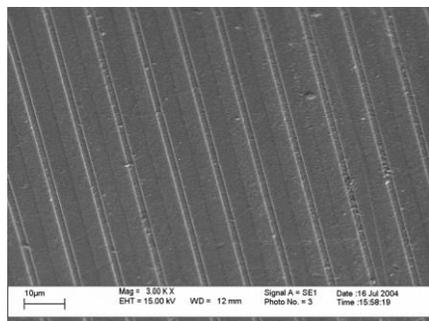
Ядерная физика.  
Детектирование взрывчатых веществ.  
Наработка ПЭТ изотопов.  
Активационный анализ.

# 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

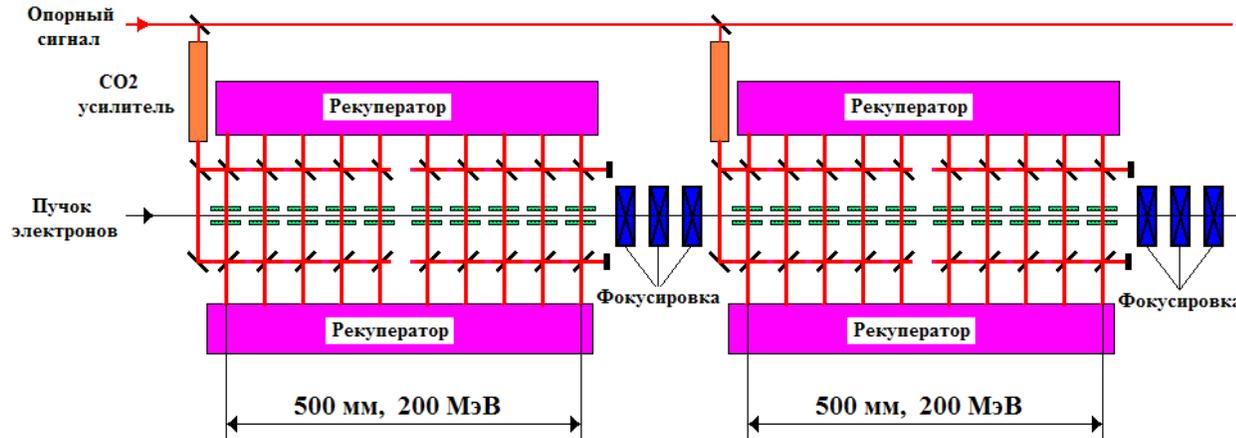


Схема ускорителя

## 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



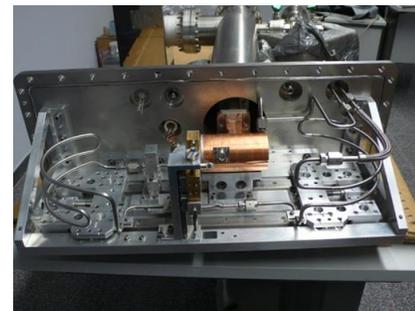
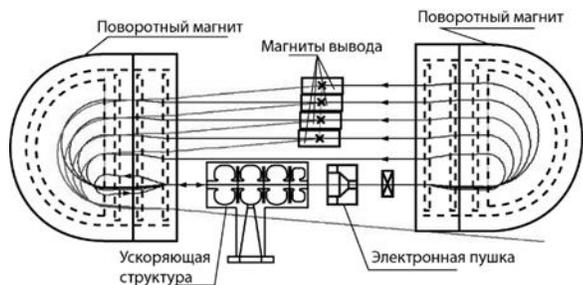
Измерения прототипа на 20 мм

# 2005 – 2012. Сотрудничество с Политехническим университетом Каталонии

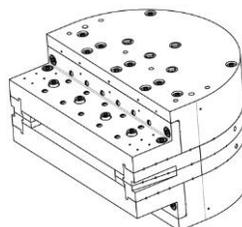
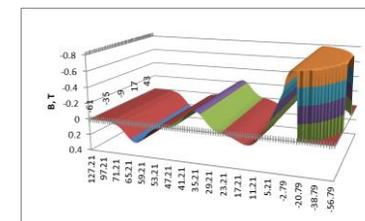
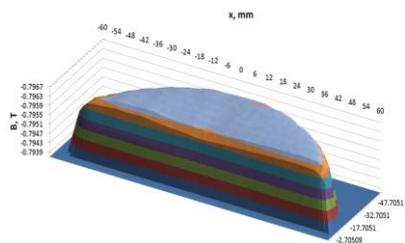
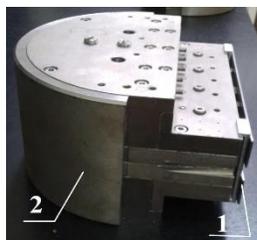
## Проект ускорителя электронов для интраоперационной лучевой терапии

- Основные характеристики:
- ✓ Энергии пучка: 6, 8, 10, 12 МэВ
- ✓ Ток пучка: ~10 нА – 10 мкА
- ✓ 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

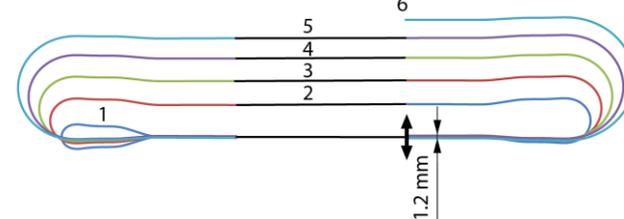
### Схема и элементы разрезного микротрона



### Изготовление и настройка магнитов



### Трассировка пучка в измеренных полях



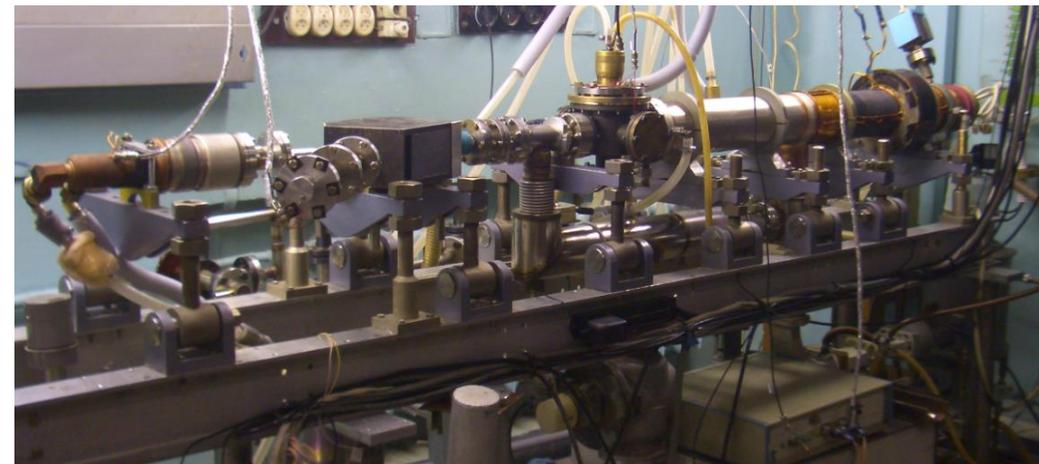
Обсуждение проекта в 2004 г. в НИИ радиологии с чл.-корр. Ю.С. Мардынским.

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

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

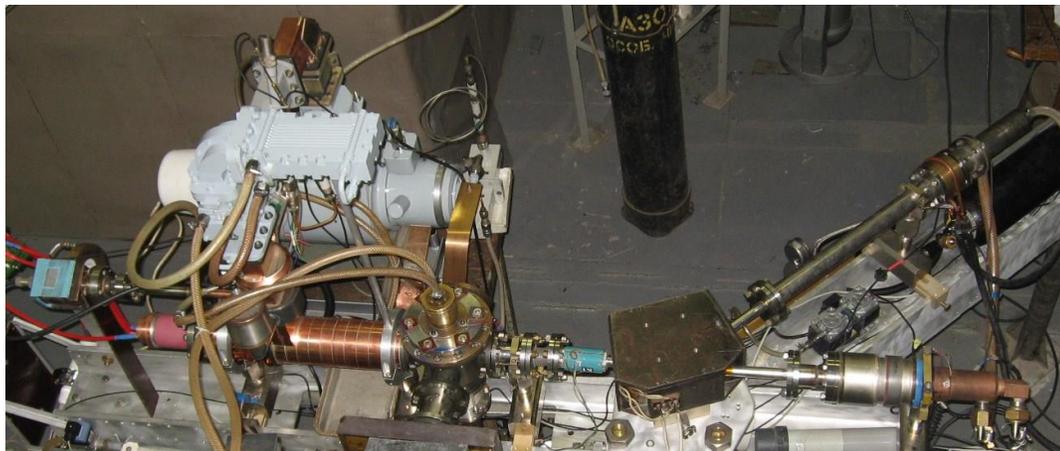
#### Параметры:

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%

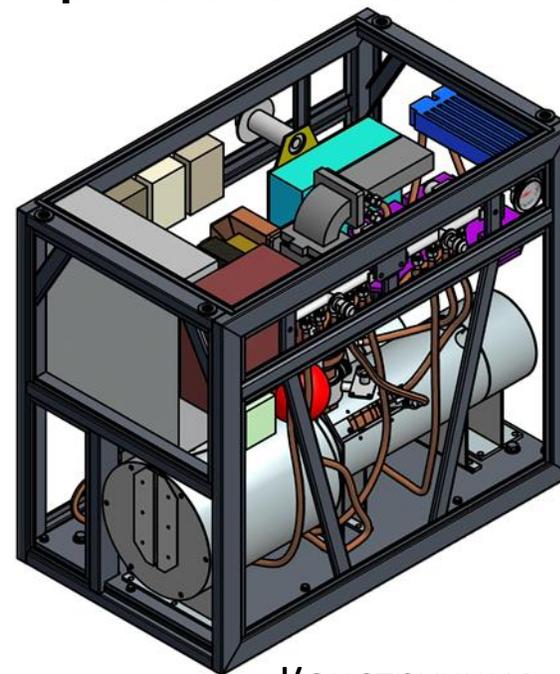


# 2007 – 2009. Сотрудничество с ФГУП «НПП «Торий» по теме ИДК

Прототип линейного ускорителя с поимпульсным переключением энергии для стационарного инспекционно-досмотрового комплекса.



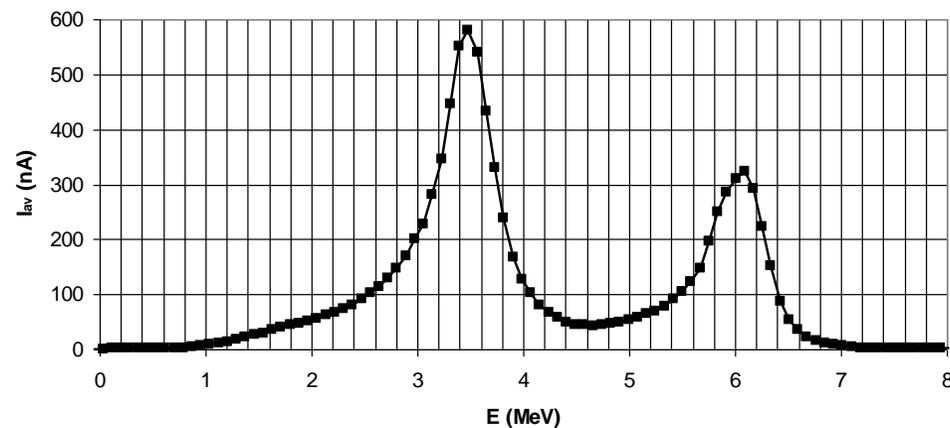
Стенд для испытаний ускоряющей системы



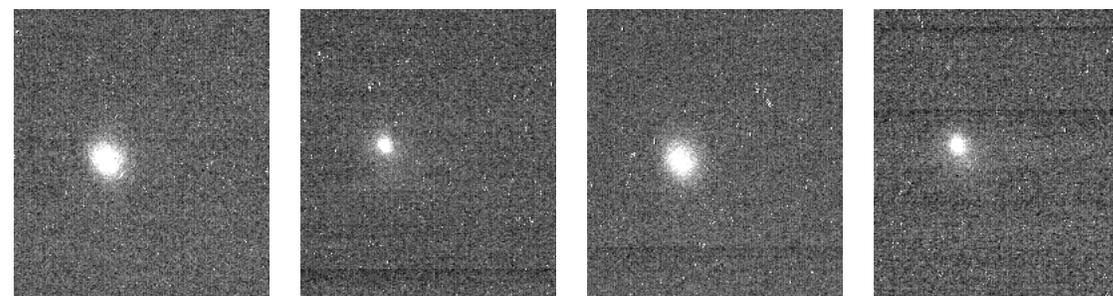
Конструкция



Излучатель в сборе



Спектр энергии



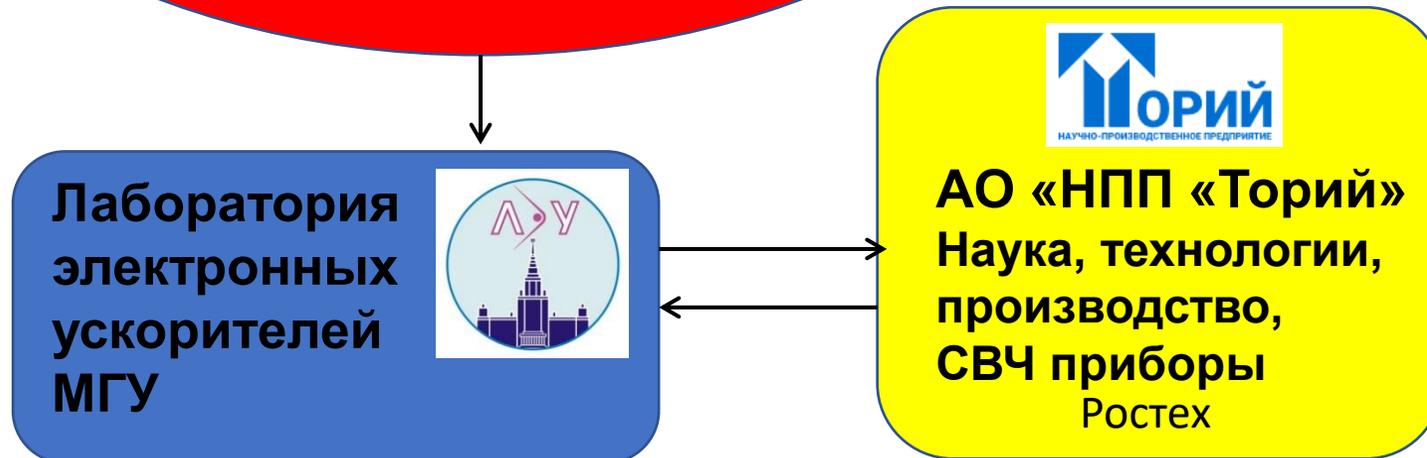
Изображения пучка

**4. 2012 – по н/в – разработка и создание промышленных образцов ускорителей прикладного назначения.**

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



Цель - практическое применение результатов интеллектуальной деятельности



**К 2020 г. ЛЭУ МГУ разработала и совместно с АО «НПП «Торий» поставила заказчикам следующие электронные ускорители:**

- Радиография	9
- Стационарные ИДК	10
- Мобильные ИДК	15
- Железнодорожные ИДК	4
- Стерилизация	2
- Медицина	1

---

**Всего: 41**

## Работа ускорителей для радиографии на предприятиях Росатома



Предприятия: «Петрозаводскмаш» (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

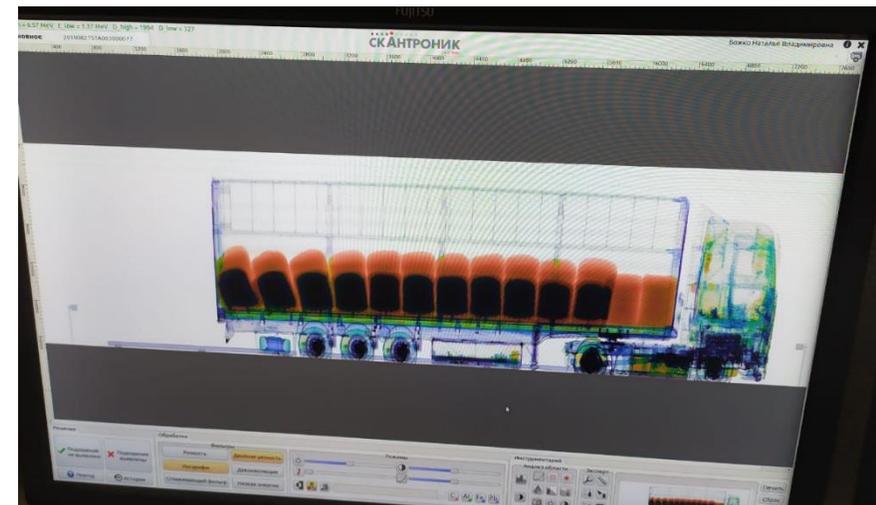
# Стационарный ИДК СТ-6035 «Скантроник Системс»



Система сканирования



Ускоритель



Изображение объекта

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

# Мобильные ИДК СТ-2630М «Скантроник Системс»



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



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



Внутри ускорителя

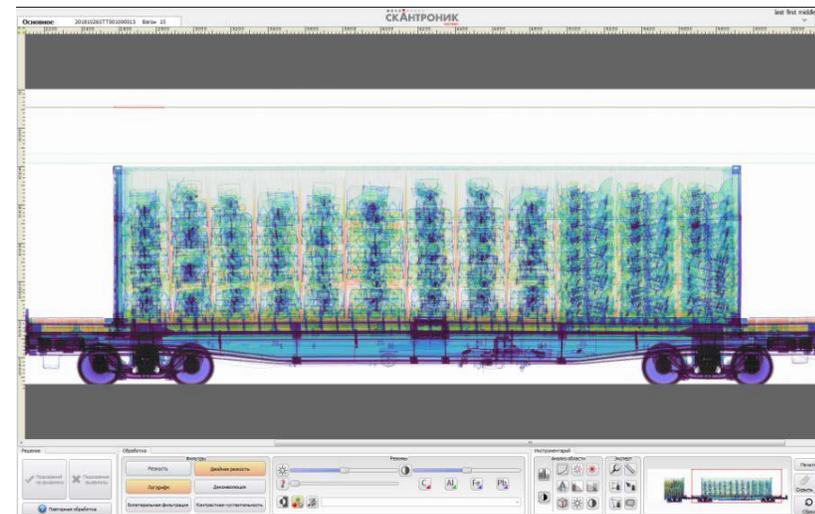
# Железнодорожный ИДК СТ-2630Т «Скантроник Системс»



Двухпутевой ж-д ИДК



Ускоритель



Изображение вагона

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

## Импульсный линейный ускоритель на энергию 10 МэВ



Ускоряющая система



Клистрон и модулятор

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.



Система контроля и источники питания

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**



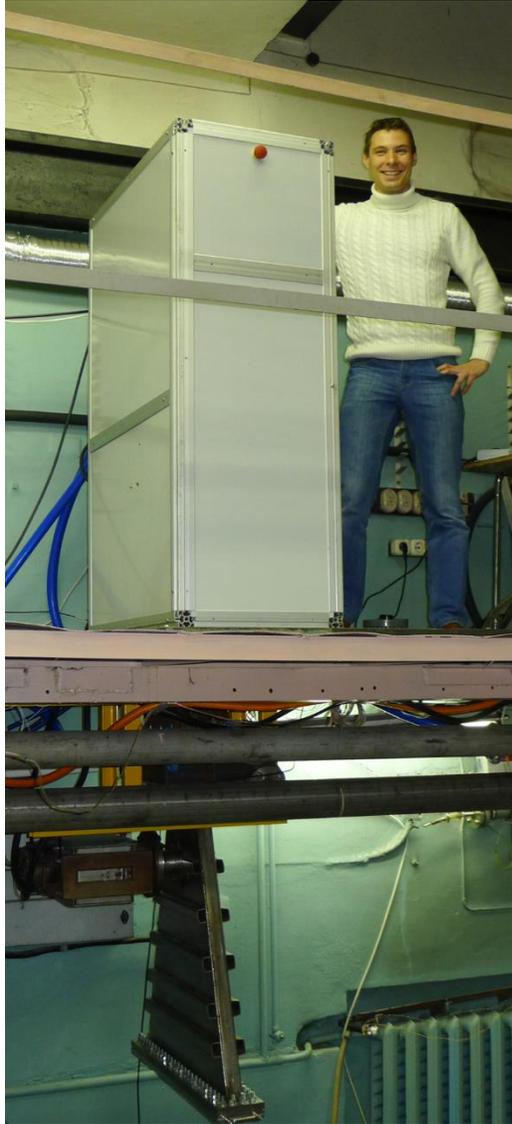
**Здание центра**



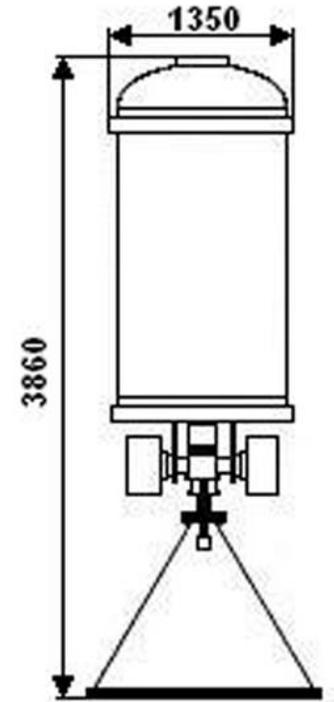
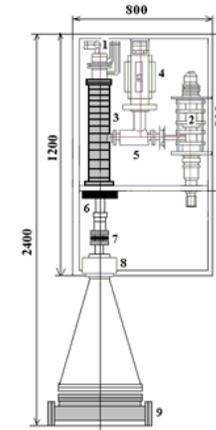
**Академик Ю.В. Гуляев и губернатор Калужской области А.Д. Артамонов на открытии центра, сентябрь 2017 г.**

<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

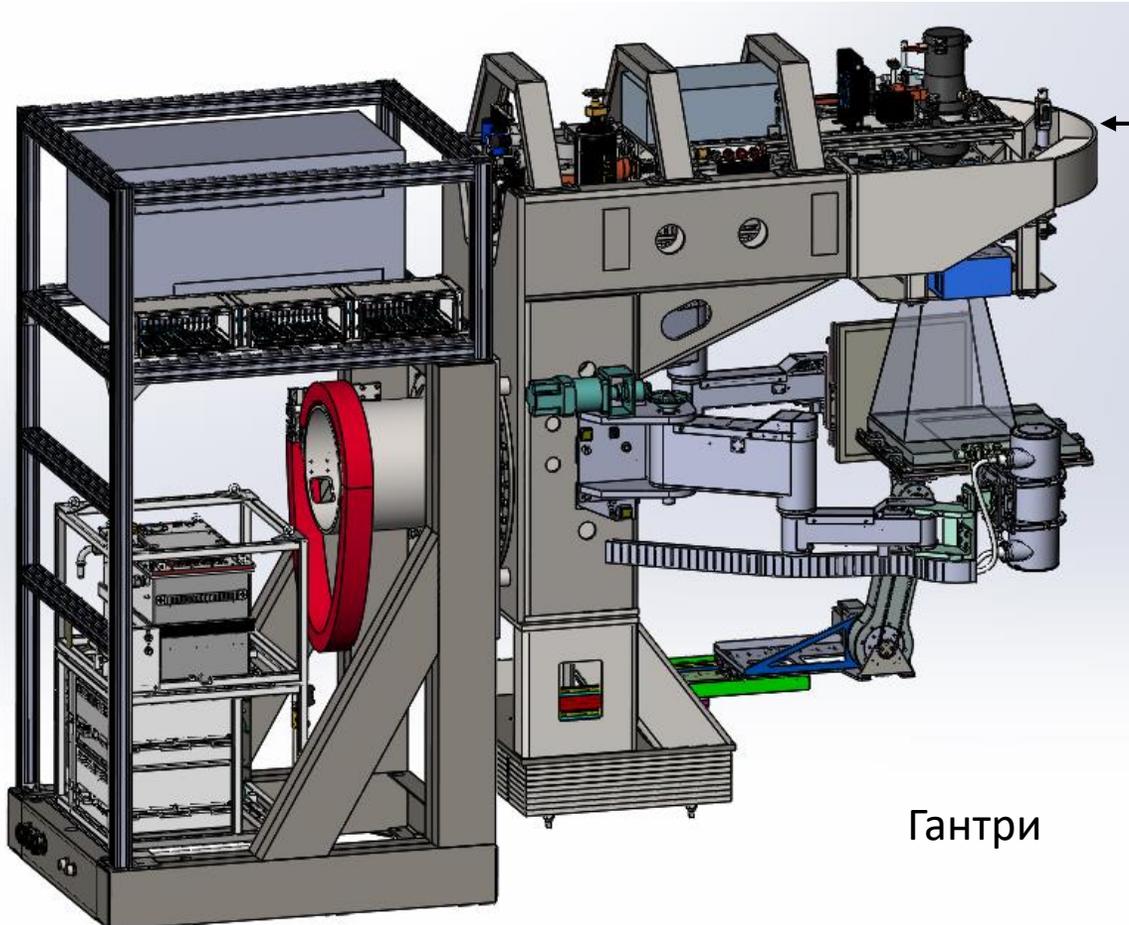
# Комплекс лучевой терапии КЛТ 6

Разработку линейного ускорителя провела ЛЭУ МГУ по контракту с НИИТФА

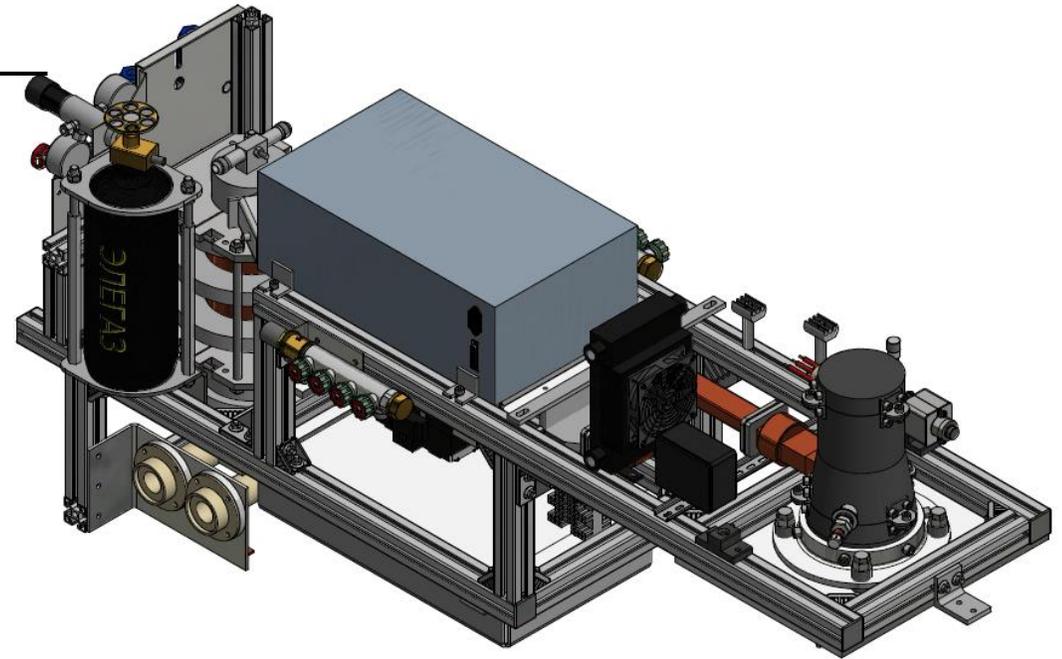
Параметры ускорителя

Энергия пучка  
Мощность дозы

2.5/6 МэВ  
10 Гр/мин

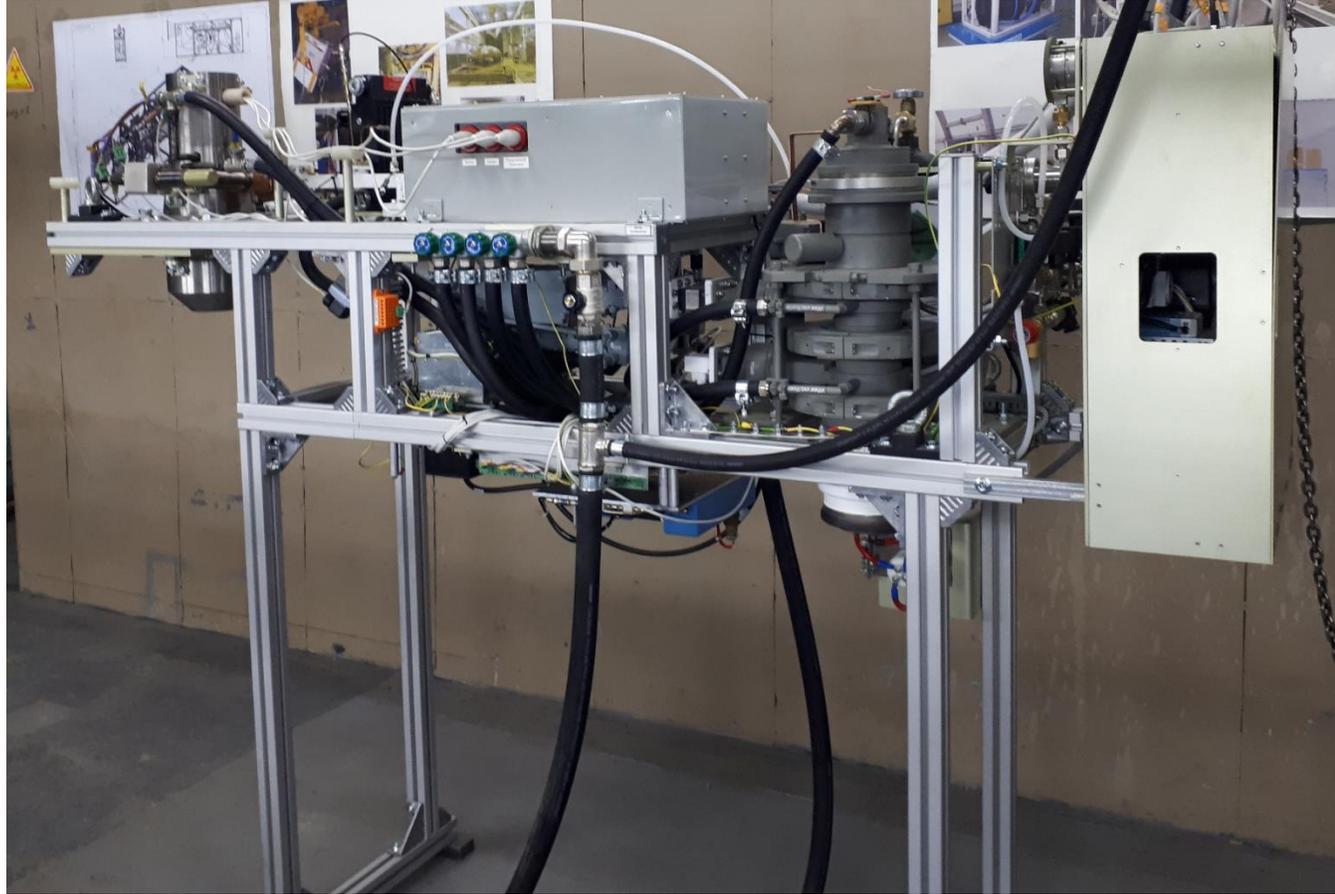


Гантри



Ускоритель

## Ускоритель комплекса лучевой терапии КЛТ 6



Испытательный стенд

Инициировав и организовав в 1982 г. работы в отделе по ускорительной тематике, **Борис Саркисович Ишханов** до последних дней оказывал этому направлению постоянную поддержку и помощь.

В настоящее время на базе НИИЯФ МГУ разрабатываются прикладные линейные СВЧ ускорители электронов для систем безопасности, радиографии, стерилизации и медицины, а также разрезные микротроны на энергию до 100 МэВ.