

# Состояние работ по ускорительной тематике в ОЭПВАЯ

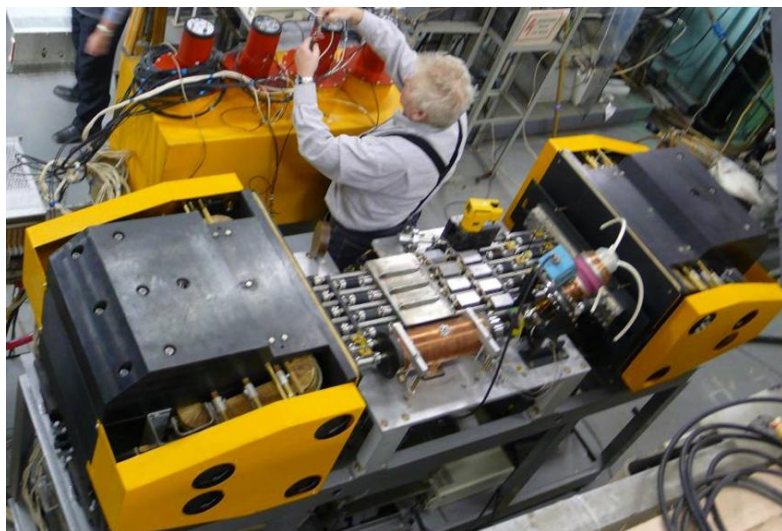
В.И.Шведунов, С.В.Абросимов, А.С.Алимов, Д.А.Бобылев, М.А.Борисов,  
М.П.Бушин, А.Н.Ермаков, А.Н.Каманин, Н.И.Пахомов, В.В.Ханкин,  
Н.В.Шведун

ОЭПВАЯ

24 февраля 2025 г.

Научная конференция НИИЯФ МГУ по итогам 2024 года

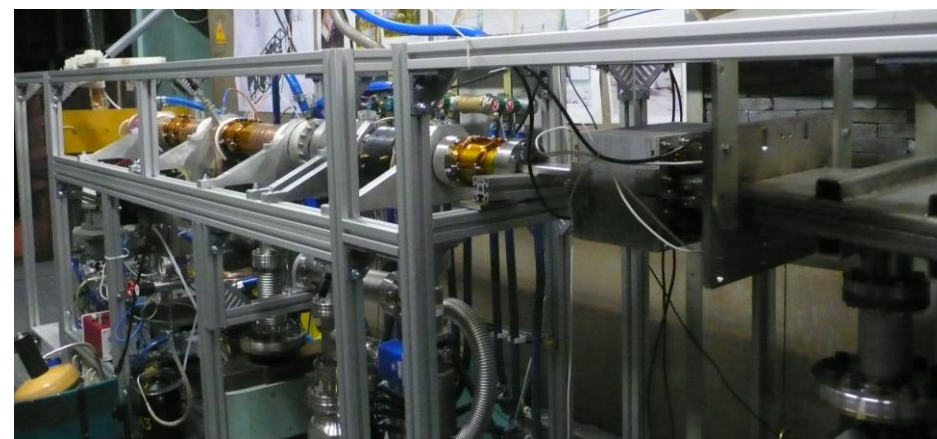
## Действующие ускорители электронов ОЭПВАЯ НИИЯФ МГУ



2009 г. Разрезной микротрон 55 МэВ



2013 г. Линейный ускоритель непрерывного действия 1 МэВ/25 кВт



2015 г. Линейный ускоритель 10 МэВ/15 кВт

## Договора ОЭПВАЯ на выполнение работ по ускорительной тематике

| № | Тема, руководитель, исполнитель                                                                                                                                                    | гг.       | Заказчик           |
|---|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|--------------------|
| 1 | Разработка системы стабилизации резонансной частоты, амплитуды и фазы ускоряющего поля многосекционных ускорителей электронов. Ермаков А.Н. – Каманин А.Н.                         | 2023-2024 | ЛЭУ МГУ            |
| 2 | Расчеты, измерение и оптимизация характеристик пучка тормозного излучения ускорителя электронов для комплекса лучевой терапии. Юров Д.С. – Борисов М.А.                            | 2023-2024 | ЛЭУ МГУ            |
| 3 | Экспериментальные и теоретические исследования метода восстановления энергетического спектра пучка электронов по кривой выхода Черенковского излучения. Ханкин В.В. – Бобылев Д.А. | 2023-2024 | ЛЭУ МГУ            |
| 4 | Экспериментальное исследование на высоком уровне СВЧ мощности системы стабилизации резонансной частоты секции ускоряющей структуры. Ермаков А.Н. – Каманин А.Н.                    | 2024-2025 | ЛЭУ МГУ            |
| 5 | Расчет и экспериментальное исследование систем линейного ускорителя электронов непрерывного действия на энергию 5 МэВ и мощность пучка 200 кВт. Юров Д.С. – Алимов А.С.            | 2024-2025 | ЛЭУ МГУ            |
| 6 | Экспериментальное исследование работы импульсных высоковольтных твердотельных модуляторов на различные нагрузки и с различными параметрами импульсов. Ханкин В.В. – Бушин М.П.     | 2024-2025 | ЛЭУ МГУ            |
| 7 | Облучение фотоэлектрических преобразователей пучком ускоренных электронов. Юров Д.С. – Алимов А.С.                                                                                 | 2024-2025 | НИИП,<br>Лыткарино |
| 8 | Расчетная оптимизация характеристик источника комптоновского излучения на ускорительном комплексе ИКИ НЦФМ с энергий квантов до 500 кэВ                                            | 2024-2025 | РФЯЦ-<br>ВНИИЭФ    |

## Некоторые публикации по ускорительной тематике за 2024 г.

2024 Development of an Electron Linac for Radiation Therapy. II. Reduction of Accelerating Field Strength, Improvement of Accelerating Structure Efficiency, Yurov D.S., Borisov M.A., Alimov A.S., Bagova S.Z., Ermakov A.N., Kamanin A.N., Lobzhanidze C.K., Pakhomov N.I., Simonov A.S., Khankin V.A., Shvedunov V.I., Shvedunov I.V., Shvedunov N.V. , Moscow University Physics Bulletin, издательство Allerton Press (New York, N.Y., United States), том 79, № 5, с. 656-664 DOI

2024 Development of an Electron Linac for Radiation Therapy. I. Suppression of Cathode Back-Bombardment Effect, Yurov D.S., Borisov M.A., Alimov A.S., Ermakov A.N., Kamanin A.N., Pakhomov N.I., Simonov A.S., Filippov Ya Yu, Khankin V.A., Shvedunov V.I., Shvedunov I.V., Shvedunov N.V., Moscow University Physics Bulletin, издательство Allerton Press (New York, N.Y., United States), том 79, № 5, с. 645-655 DOI

2024 Electron Beam Energy Sensor Based on the Vavilov–Cherenkov Effect, Bobylev D.A., Siomash M.D., Khankin V.V., Shvedunov V.I., Instruments and Experimental Techniques, издательство Pleiades Publishing, Ltd (Road Town, United Kingdom), том 67, № 1, с. 82-89

2024 Система сканирования пучка промышленного ускорителя электронов, Борисов М.А., Шведун В.И., Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), том 79, № 2, с. 2421001-1-2421001-10

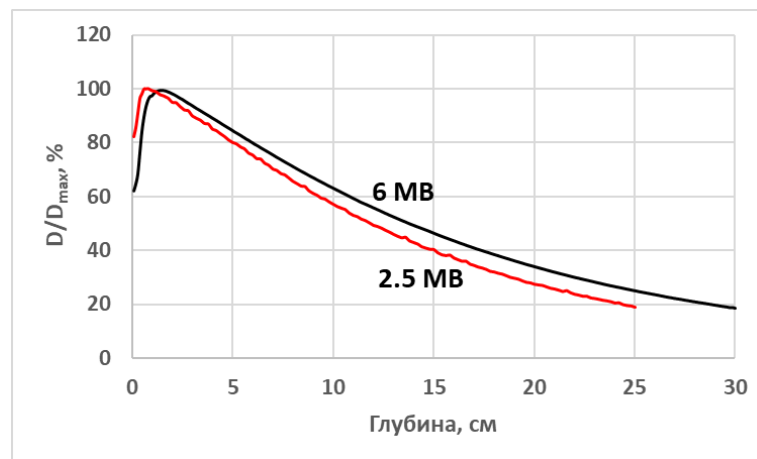
2024 Накопительное кольцо комптоновского источника НЦФМ, Бобылев Д.А., Шведун В.И., Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), том 79, № 2, с. 2420207-1-2420207-13

2024 Лазерно-электронный источник рентгеновского излучения (по материалам вступительного слова на Семинаре НИИЯФ МГУ, посвящённом 85-летию Б. С. Ишханова, 26 октября 2023 г.), Артюков И.А., Виноградов А.В., Шведун В.И., Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, издательство Изд-во Моск. ун-та (М.), том 79, № 2 DOI

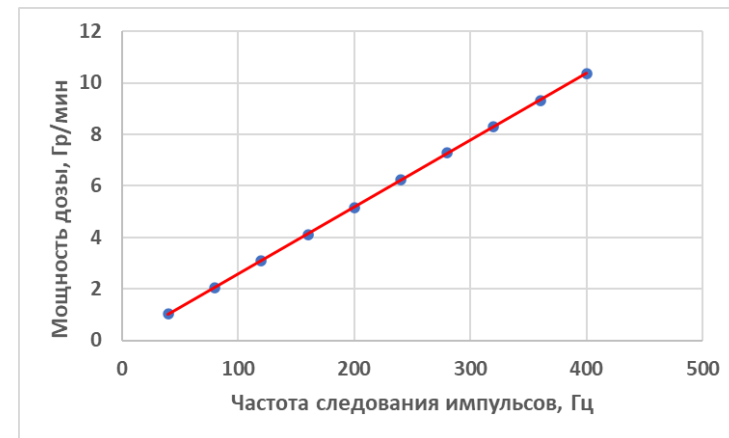
# Результаты испытаний ускорителя для комплекса лучевой терапии



Ускоряющая система С-диапазона



Процентные глубинные дозы для энергий 2.5 МэВ и 6 МэВ

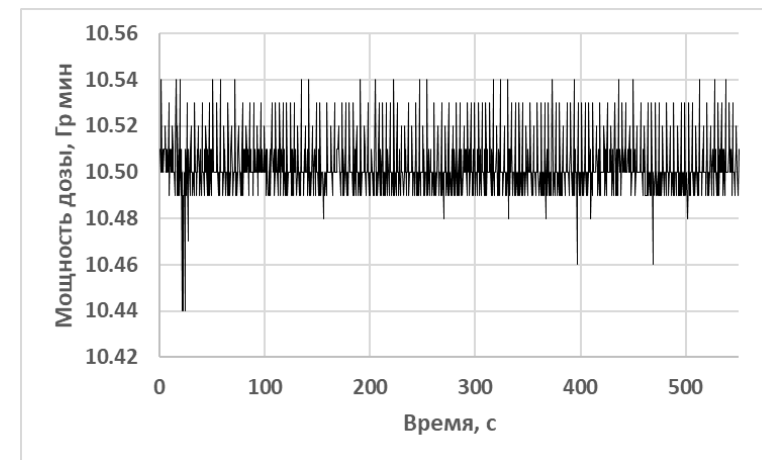


Зависимость мощности дозы от частоты следования импульсов

Измеренное значение  $TPR_{20,10}$  составляет 0.629 для 6 МэВ при проектном значении  $TPR_{20,10} = 0.634 \pm 0.01$

Максимальная мощность дозы превышает проектное значение 10 Гр/мин.

Долговременная стабильность мощности дозы на уровне 0.1%



Зависимость мощности дозы от времени при максимальной частоте следования импульсов

# Облик ускорительного комплекса ИКИ НЦФМ с максимальной энергией 120 МэВ

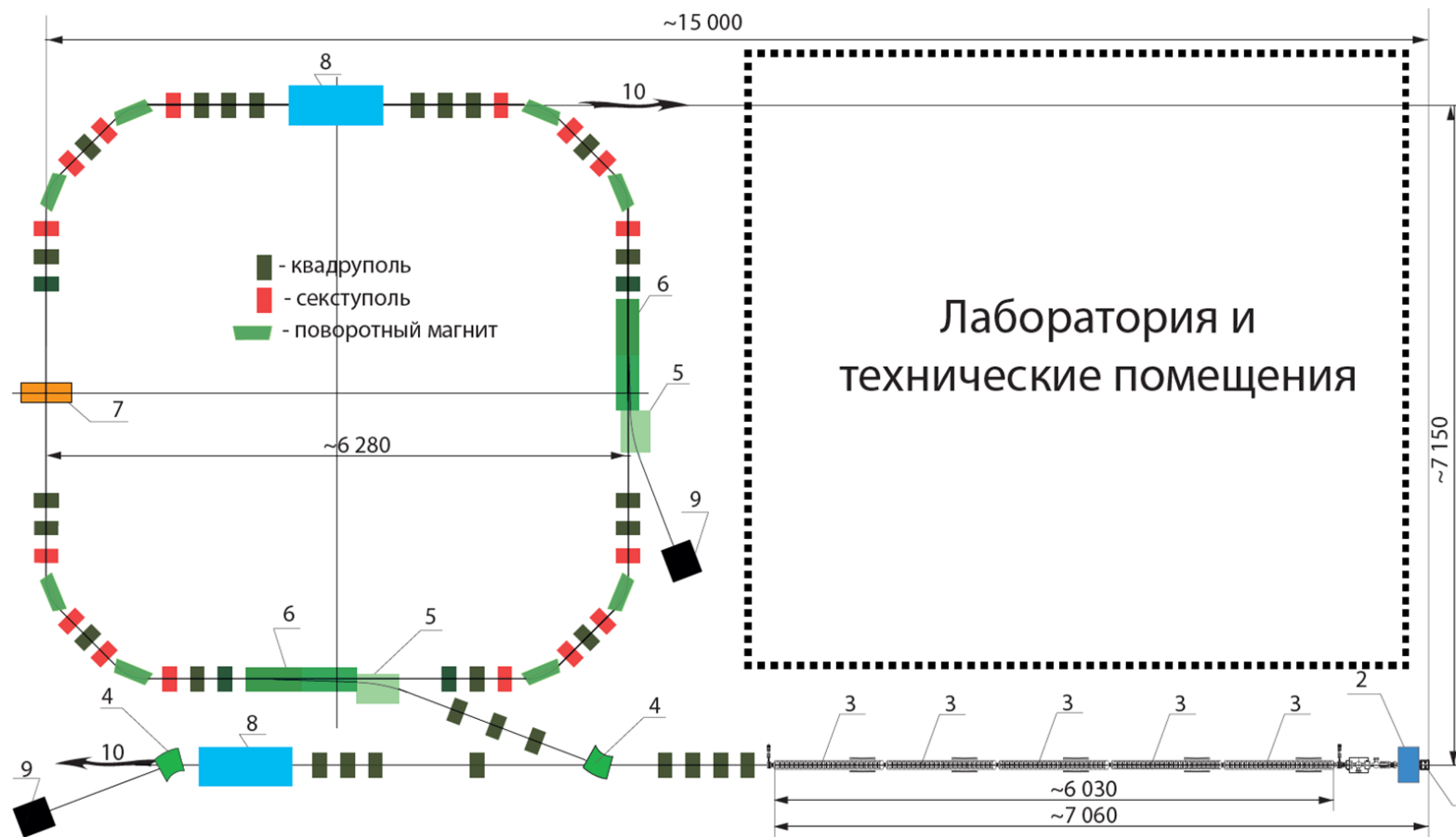


Схема ускорительного комплекса ИКИ на энергию 120 МэВ. 1 – СВЧ пушка, 2 – соленоид, 3 – секция ускоряющей структуры, 4 – поворотный магнит, 5 – септум-магнит, 6- кикер, 7 – ВЧ резонатор, 8 – камера взаимодействия, 9 – поглотитель пучка, 10 – рентгеновское излучение.

# Разработка линейного ускорителя электронов НИИЯФ МГУ для исследования фотоядерных реакций и наработки медицинских изотопов

Номинальная энергия электронов в пучке

35 МэВ.

Диапазон регулировки энергии электронов в пучке

10-35 МэВ

Энергетический разброс электронов на выходе из ускорителя

не более 10%.

Номинальный импульсный ток ускоренного пучка электронов

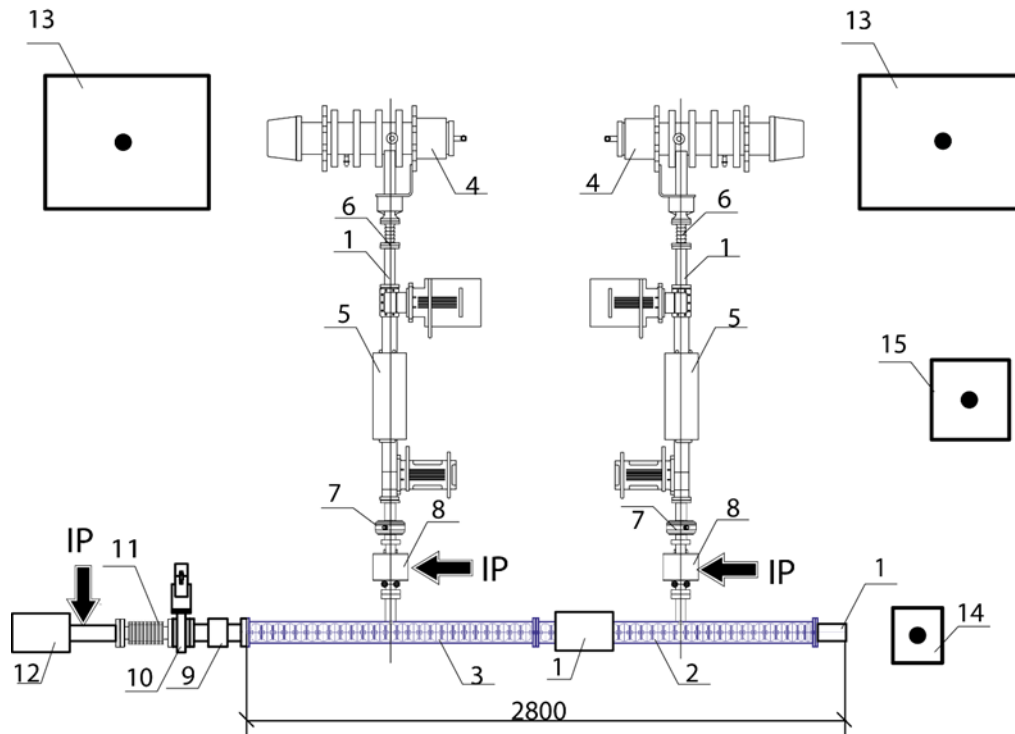
100 мА.

Номинальный средний ток пучка электронов на мишенном устройстве

100 мкА.

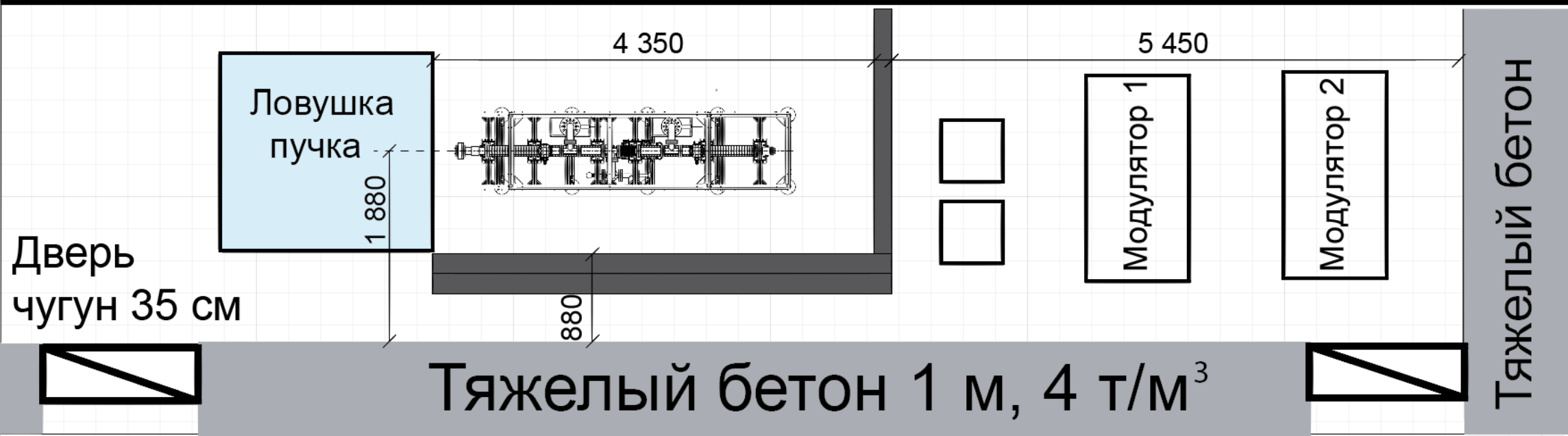
Диапазон регулировки среднего тока электронов

30–100 мкА.

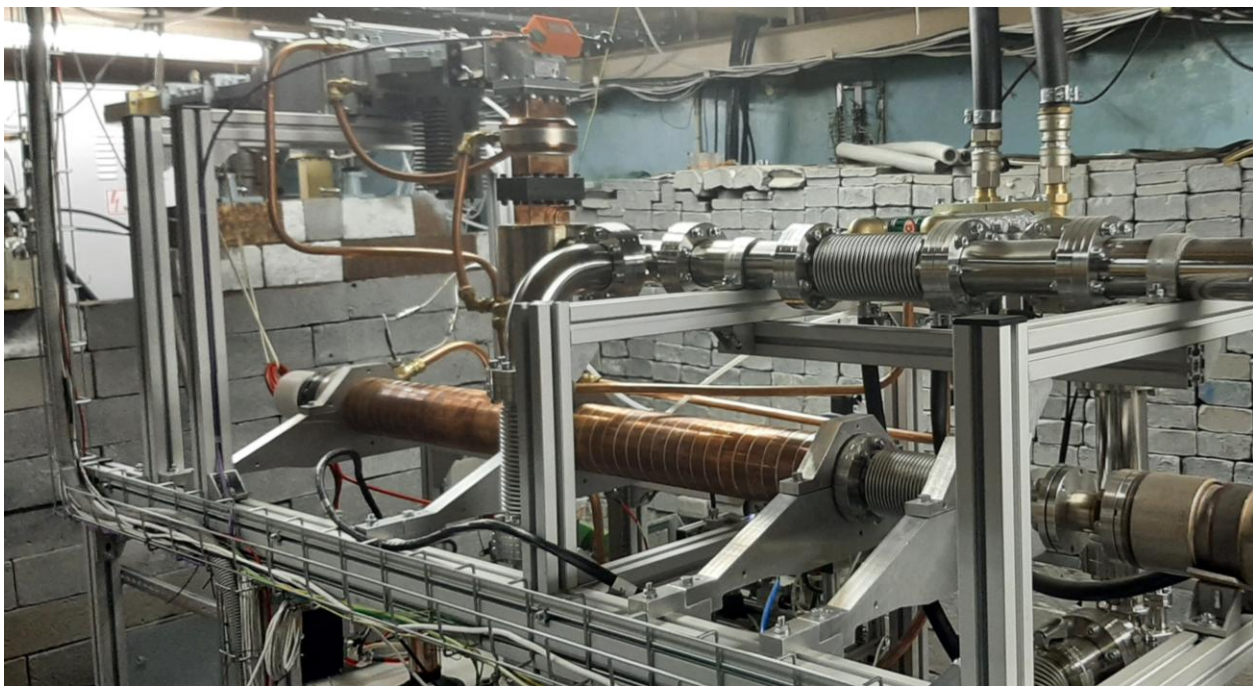


1 – электронная пушка с термокатодом, 2 – секция нерегулярной ускоряющей структуры, 3 – секция регулярной ускоряющей структуры, 4 – клистрон, 5 – ферритовый вентиль, 6 – гибкий волновод, 7 – вакуумное СВЧ окно, 8 – узел откачки, 9 – датчик тока пучка, 10 – вакуумный затвор, 11 – сильфон, 12 – тормозная мишень, 13 – высоковольтный модулятор клистрона, 14 – высоковольтный модулятор пушки, 15 – система контроля и управления.

# Линейный ускоритель 35 МэВ



## Пуско-наладка линейного ускорителя электронов для исследования фотоядерных реакций и наработки медицинских изотопов



Первая секция ускоряющей структуры



Клистроны



Модуляторы

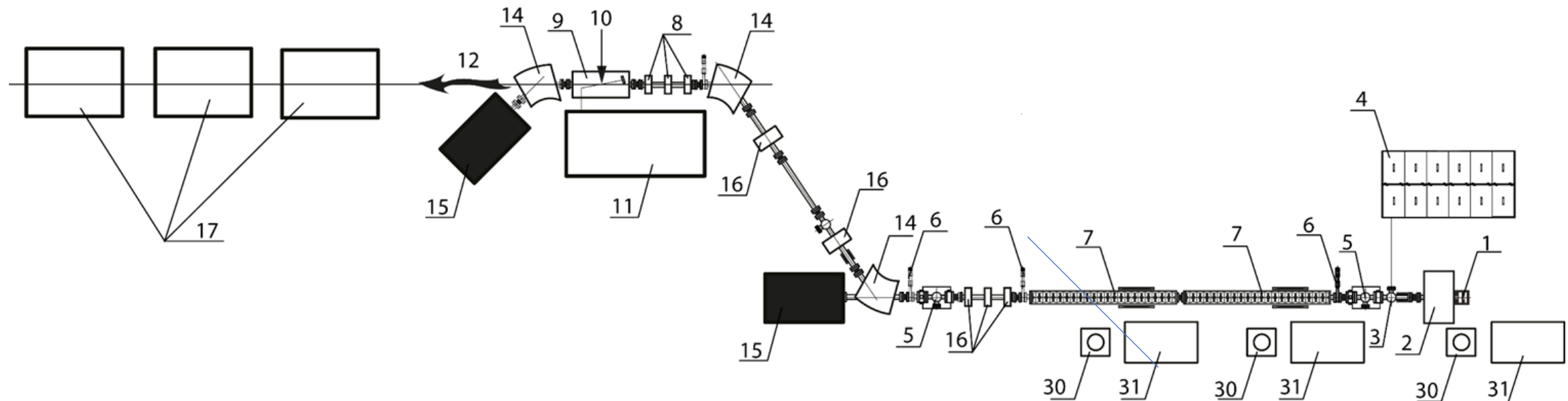


# Стенд комптоновского источника НИИЯФ МГУ

## Выходные параметры рентгеновского излучения комптоновского источника

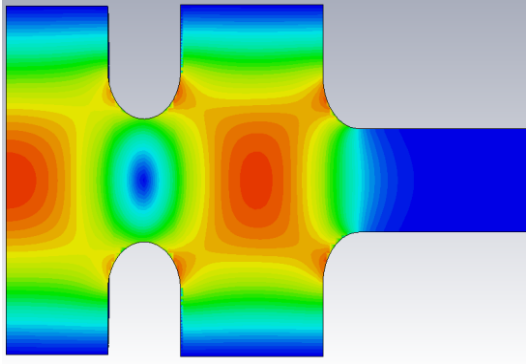
| Параметр                                                                         | Значение для 50 МэВ  |
|----------------------------------------------------------------------------------|----------------------|
| Число рентгеновских фотонов в импульсе                                           | $1,64 \cdot 10^7$    |
| Средний рентгеновский поток, фот/с                                               | $1,64 \cdot 10^{10}$ |
| Пиковая спектральная яркость, $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}0,1\%$ | $3,8 \cdot 10^{18}$  |
| Средняя спектральная яркость, $\text{с}^{-1}\text{мм}^{-2}\text{мрад}^{-2}0,1\%$ | $3,8 \cdot 10^{10}$  |
| Минимальная спектральная ширина без монохроматора                                | 350 эВ               |
| Минимальная угловая ширина без коллимации                                        | 1,8 мрад             |

|                                                        |                       |
|--------------------------------------------------------|-----------------------|
| Максимальная энергия ускоренного пучка                 | $50 \pm 2$ МэВ        |
| Диапазон регулирования энергии                         | 35 – 50 МэВ           |
| Разброс по энергии                                     | $0,25 \pm 0,1\%$      |
| Нормализованный эмиттанс                               | $1 \pm 0,5$ мм мрад   |
| Среднеквадратичный радиус пучка в точке взаимодействия | $30 \pm 10$ мкм       |
| Заряд сгустка                                          | $100_{-0}^{+100}$ пКл |
| Длительность сгустка                                   | $10 \pm 4$ пс         |
| Максимальная частота следования сгустков               | 1000 Гц               |

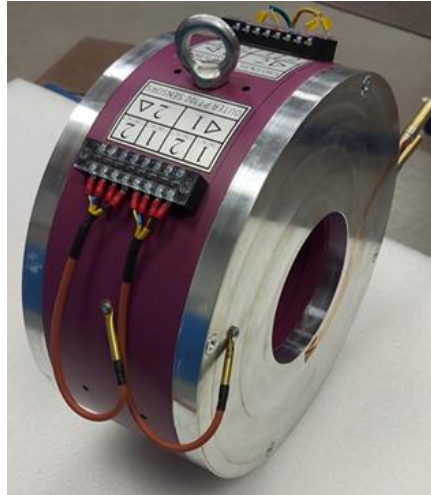


1 – СВЧ пушка с фотокатодом, 2 – соленоид, 3 – окно ввода лазерного излучения, 4 – лазер фотокатода, 5 – станция диагностики пучка, 6 – вакуумный затвор, 7 – ускоряющая структура, 8 – триплет квадрупольных линз, 9 – камера взаимодействия, 10 – точка взаимодействия, 11 – основной лазер, 12, 13 – рентгеновское излучение, 14 – поворотный магнит, 15 – поглотитель пучка, 16 – квадрупольная линза, 17 – рабочая станции, 30 - импульсный клистрон, 31 – модулятор

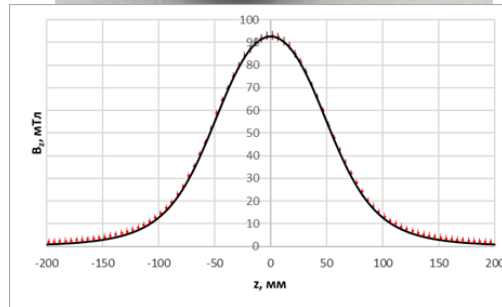
СВЧ пушка



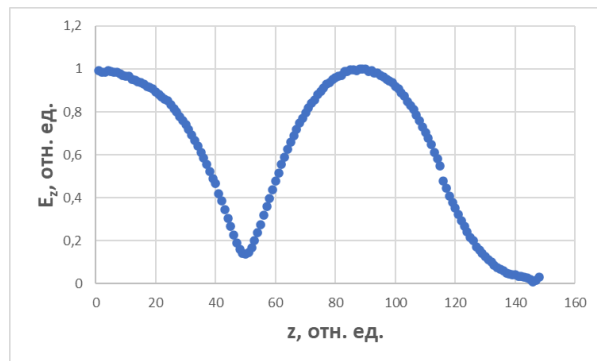
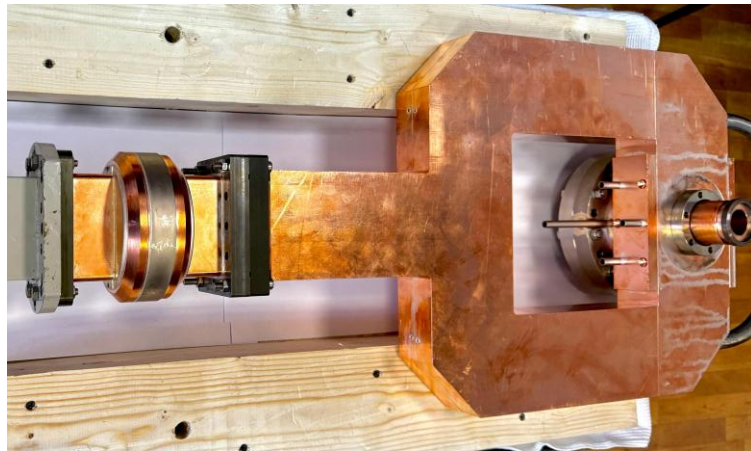
Соленоид



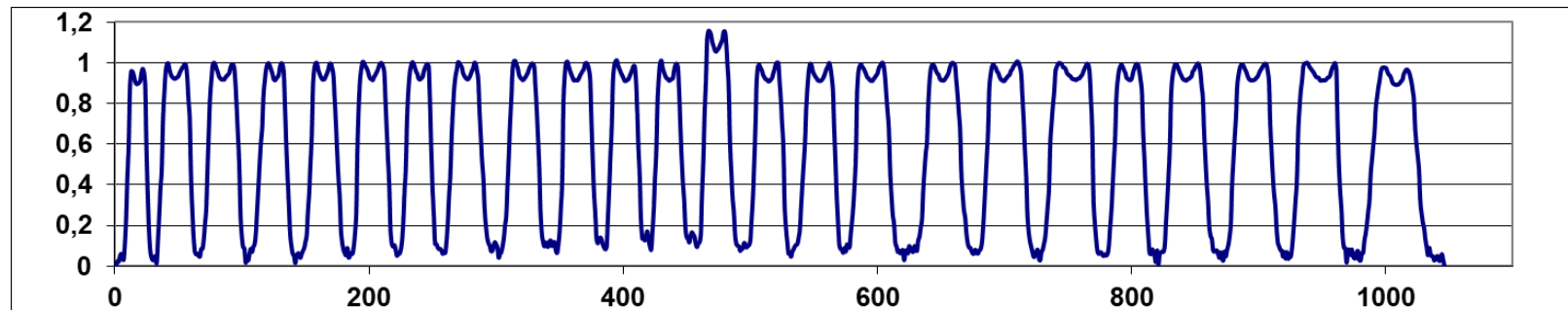
Ускоряющая структура



Распределение поля: расчет и измерения

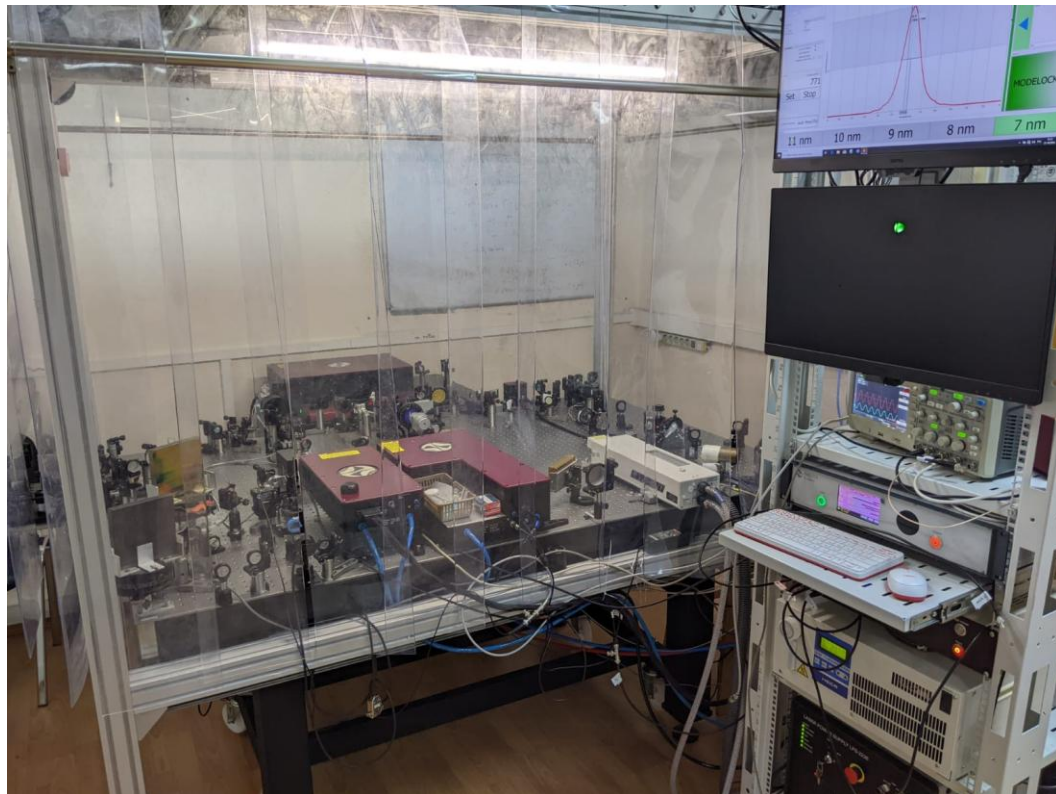


Измеренное распределение поля



Измеренное распределение поля

## Лазерные системы (Физический факультет МГУ, проф. А.Б. Савельев)

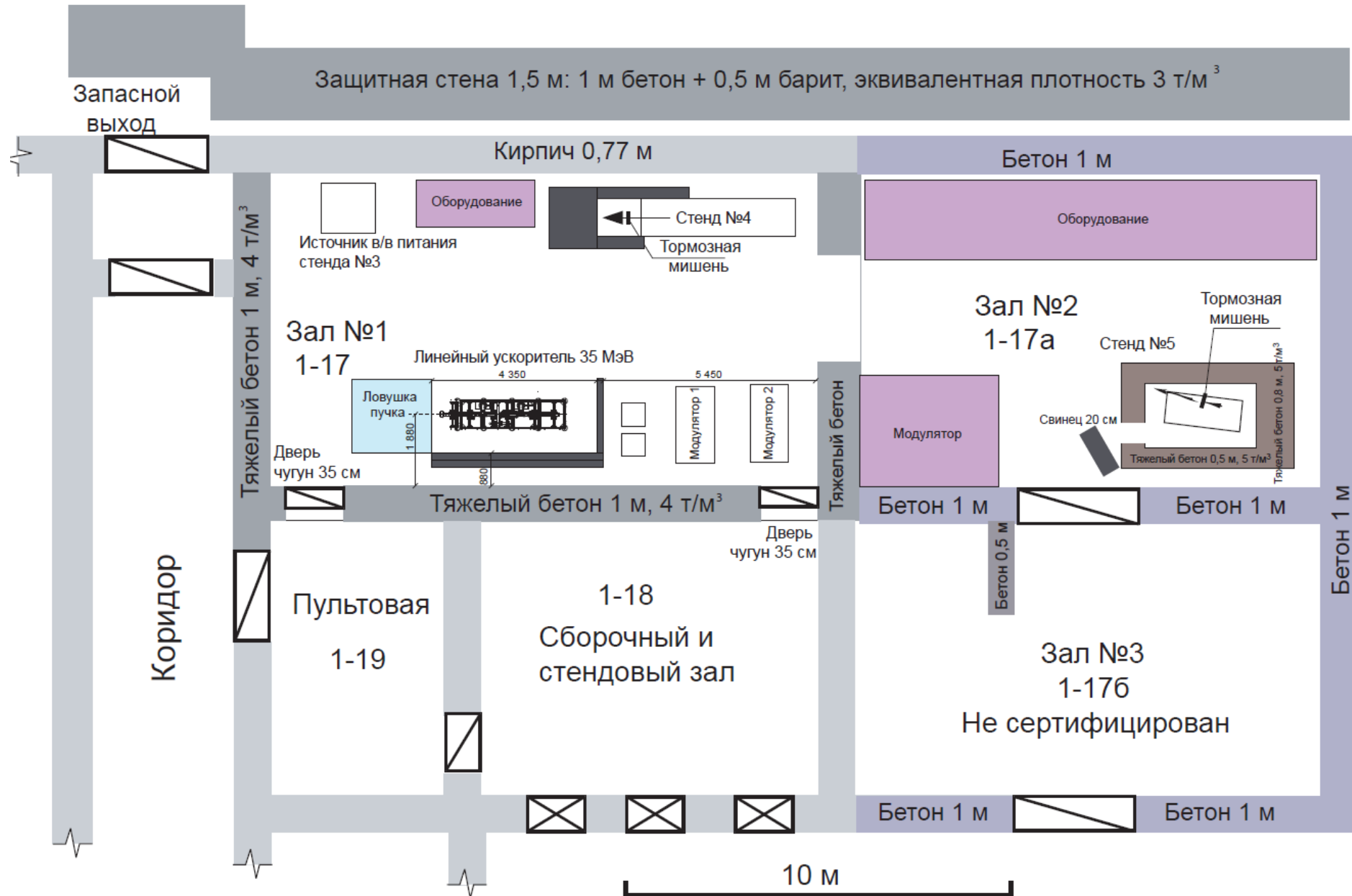


Действующая лазерная система  
фотокатода

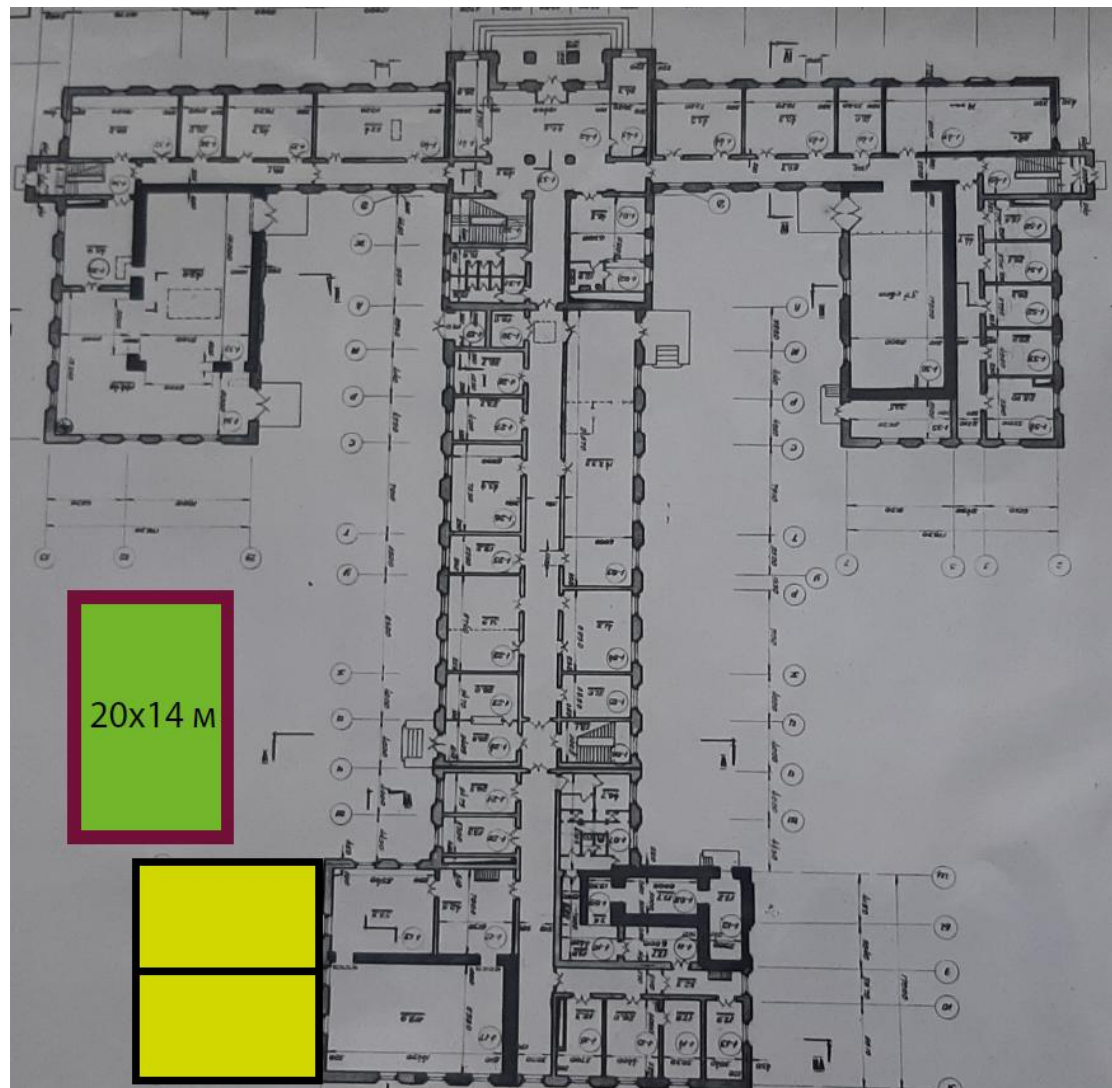


Подготовка лазерных систем фотокатода и точки  
взаимодействия

# Размещение оборудования в ускорительных залах ОЭПВАЯ



# Необходим бункер для размещения комптоновского источника и ускорителя на 35 МэВ



**Спасибо за внимание!**