Приложение 3.

Форма открытия (продления) Проекта

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

Трубников Г.В./_____/

“___“ _____ 2026г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ОТКРЫТИЯ / ПРОДЛЕНИЯ ПРОЕКТА / ПОДПРОЕКТА ПО НАПРАВЛЕНИЮ ИССЛЕДОВАНИЙ В ПРОБЛЕМНО-ТЕМАТИЧЕСКОМ ПЛАНЕ ОИЯИ

1. Общие сведения о проекте

1.1. Шифр темы: 03-4-1146-2024 «Нейтронная ядерная физика»

1.2. Шифр проекта: 03-4-1146-2-2022/2027

1.3. Лаборатория: ЛНФ

1.4. Научное направление: Ядерная физика (03)

1.5. Наименование проекта: Модернизация ускорителя ЭГ-5 и его экспериментальной инфраструктуры. Продление на 2027

1.6. Руководитель(и) проекта Дорошкевич А.С.

1.7. Заместитель(и) руководителя проекта:

1.8. Научный руководитель проекта:

2. Научное обоснование и организационная структура
2.1. Аннотация

Проект направлен на модернизацию основных систем электростатического ускорителя заряженных частиц ЭГ-5, развитие ионно-лучевых и комплементарных им методов исследования элементного состава и физических свойств приповерхностных слоев твердых тел.

Цель проекта: обеспечение технической возможности для реализации научной программы ПТП ОИЯИ по исследованию реакций с быстрыми квазимоноэнергетическими нейтронами, развитие ядерно-физических методов исследования элементного состава, решение задач нейтронного радиационного материаловедения.

Задачи проекта. **Основной технической задачей** (Задача 1) Проекта является восстановление диапазона энергий ускоренных частиц: 900 кэВ - 4,1 МэВ и повышение тока ионного пучка до 100 мкА при сохранении энергетической стабильности ионного пучка на уровне не хуже 500 эВ. Основной **организационной задачей** является закладка и развитие кадрового потенциала для обеспечения полноценного выполнения проекта и работы ускорительного комплекса в перспективе минимум 3-х семилеток (Задача 3). В организационные задачи проекта, так же, входит обновление экспериментальной инфраструктуры ускорительного комплекса (Задача 2), в частности, развитие новых методов исследования физических свойств поверхности материалов, способных дополнить и повысить качество получаемой научной продукции, интенсификация международного научно-технического сотрудничества, организация пользовательской программы.

Основным **критерием успешного выполнения проекта** является: получение потока нейтронов, достаточного для проведения ядерно-физических экспериментов с быстрыми нейтронами, энергетической (4,1 МэВ, ток ионов 100 мкА при стабильности ионного пучка - не хуже 500 эВ).

Существующий задел. Заделом являются результаты научно-технической деятельности по модернизации ЭГ-5 в течение 2024 – 2026 (см. отчет ниже). В настоящий момент практически достигнуты паспортные характеристики ЭСУ, решены задачи модернизации вакуумной и газокомпрессорной систем; на завершающем этапе - организационные мероприятия по возобновлению работы ЭСУ.

Ожидаемые результаты по завершении проекта в 2027:

В результате выполнения Проекта в 2027г будет установлен новый СВЧ ионный источник на имеющуюся ускорительную трубку (УТ), за счет чего будет достигнут максимальный ток ионного пучка порядка 100мкА (1) (июль 2027). Будет установлена станция безмасляной откачки объема «котла» (2) (январь 2027), в результате чего будет достигнуто напряжение на кондукторе порядка 4,1МВ. Так же, будет заменен азотный испаритель в газокомпрессорной установке (3) (октябрь 2027). В результате проведения этих (1-3) мероприятий параметры ионного пучка достигнут уровня (4,1МэВ, 100мкА при энергетическом разбросе 500эВ), достаточного для реализации в ОИЯИ исследований реакций с быстрыми нейтронами

Будет проведена автоматизация основных систем ускорителя (4), в частности, вакуумной системы, системы управления ИИ и системы проводки ионного пучка. В частности, будет разработан проект автоматизации и контроля технических систем ускорителя, проведена разработка и практическая реализация системы управления новым источником ионов (июнь 2027).

В специализированной лаборатории для подготовки объектов исследования будет закончен монтаж электропроводки, косметический ремонт, установлен и введен в эксплуатацию электронный микроскоп, проведено техническое дооснащение химической лаборатории (5) (июнь 2027).

Будет возобновлена эксплуатация ЭСУ в комплексе с газокомпрессорной станцией (6) (январь 2027). Будет увеличено количество инженеров в технической группе для реализации задач проекта модернизации в полном объеме и обеспечения бесперебойной работы ускорителя в процессе реализации пользовательской программы в перспективе 20лет (7)

январь 2027. Кроме указанных мероприятий в 2027г будет проведена склейка новой УТ (февраль 2027). После возобновления эксплуатации на ускорителе будут проводиться работы на физический эксперимент (порядка 100 часов в 2027г), что обеспечит выполнение технических проектов, в частности, проекта с АО «Микрон» и с Госкорпорацией «РОСАТОМ» (согласование технического задания), а так же, частично выполнение научной программы по теме 1146 согласно ПТП ОИЯИ [1].

Мероприятия по установке новой УТ и настройке высоковольтной системы ЭГ-5 с новой УТ и ИИ не входят в рамки данного проекта и перенесены на последующие этапы модернизации ускорительного комплекса ЭГ-5.

Модернизация ЭГ-5 в ОИЯИ, где имеются высококвалифицированные специалисты, хорошая детектирующая аппаратура и ценные наработки по исследованию атомных ядер нейтронами, даст возможность проведения в краткосрочной перспективе ряда новых, уникальных экспериментов по измерению энергетических спектров и угловых распределений заряженных частиц из реакций (n, α) и (n, p) / (α, n) и (p, n) и интегрального и дифференциального сечений последних в интервале энергий нейтронов до ~6 МэВ, процессов деления атомных ядер быстрыми нейтронами, активационного анализа, проведение экспериментов в области нейтронного материаловедения и др..

Актуальность проекта продиктована востребованностью данной установки в составе научно- технической инфраструктуры ЛНФ ОИЯИ / ОИЯИ, в частности, для возобновления исследований ядерных реакций с быстрыми нейтронами (в том числе, необходимых для проекта нового реактора для ОИЯИ), необходимостью проведения прочих ядерно-физических экспериментов, развития перспективных современных научных направлений - радиационного материаловедения, ионно-имплантационных нанотехноллгий, радиобиологии. Модернизированный EG-5, который ускоряет легкие изотопы с низкой энергией и высоким током, является идеальным инструментом для исследований в области ядерной астрофизики. Он особенно эффективен для изучения реакций захвата протонов, что позволяет исследовать так называемые p-ядра, а также реакции нуклеосинтеза, протекавшие в момент Большого взрыва [Рекомендации 61-го ПКК по ядерной физике].

Ввод в эксплуатацию на номинальной мощности ускорителя позволит увеличить объем проводимых в ЛНФ научных исследований в рамках Дорожной карты ОИЯИ и ПТП ОИЯИ, обеспечит возможность осуществления юзерской политики на установке ЭГ-5.

Пути решения задач. 1. Коллектив проекта включает специалистов мирового уровня в области разработки ЭСУ – техники (проф. С.Ю. Таскаев), инженерно-технические работники с многолетним опытом обслуживания и ремонта всех узлов установки ЭГ-5, прочих специалистов, что гарантирует решение проблемы согласования нового СВЧ источника с имеющейся ускорительной трубкой. Пополнение сектора техническими специалистами (6 человек) обеспечит достаточный человеческий ресурс для выполнения технической части проекта и круглосуточной эксплуатации ЭСУ в дальнейшем. За время реализации проекта новые специалисты пройдут обучение навыкам управления и ремонта ЭСУ.

2. Непосредственное участие специалистов Новосибирского ИЯФ им. Будкера под руководством проф. Таскаева С.Ю. гарантирует корректную замену старого ВЧ ионного источника новым СВЧ ионным источником, его параметрическое согласование с имеющейся УТ.

3. Установка высокопроизводительной станции безмасляной откачки объема «котла» позволит повысить диэлектрическую проницаемость газа в объеме «котла» и повысить напряжение на кондукторе до 4,1МВ. Кроме того, новая станция позволит значительно сократить время перевода ускорителя в рабочее состояние после проведения сервисных / ремонтных работ. В целом, эти мероприятия позволят достичь заявленных токов ионного пучка порядка 100мкА и энергии однозарядных ионов легких газов порядка 4.1МэВ при сохранении энергетической стабильности на уровне 500эВ.

4. Опытные специалисты из Новосибирского ИЯФ им. Будкера будут заниматься разработкой системы управления ионным источником, что гарантирует решение задачи управления и автоматизации ИИ.

5. Специалисты из группы «Установка ИРЕН», имеющие опыт автоматизации установки ИРЕН будут привлечены для автоматизации технических систем ЭСУ ЭГ-5.

6. Сотрудники ЭТО ЛНФ будут заниматься электрификацией помещений специализированной лаборатории в к.120, что гарантирует качество проводимых работ.

Оценочная стоимость проекта модернизации ЭСУ и ускорительного комплекса в 2027г за исключением ФЗП составляет $250 тыс. Финансы требуются для склейки УТ (30k$), замены испарителя для газокомпрессорной станции (100k$), закупки приборов для автоматизации технических систем ЭГ-5 (70k$), закупки оборудования для оснащения ускорительного комплекса (50k$).

2.2. Научное обоснование (цель, актуальность и научная новизна, методы и подходы, методики, ожидаемые результаты, риски *до 20стр*)

Актуальность. Тематический план исследований в ЛНФ, связанных с ускорителем ЭГ-5 (сектор востребованности ускорителя ЭГ-5). В настоящий момент крайне актуальными являются ядерно-физические исследования с использованием электростатических ускорителей. Актуальные ***данные о характеристиках нейтрон-ядерных взаимодействий*** необходимы для понимания механизмов ядерных реакций. ***Исследования структуры атомных ядер*** важны для моделирования новых ядерно-физических установок и для ядерной энергетики. ***Ионно-лучевые спектрометры***, построенные на базе электростатических ускорителей, обладают высокой точностью и необходимы в современных исследованиях, сопряженных с нанотехнологиями. Крайне перспективным и жизненно важным направлением науки является ***радиационная медицина***. Требуются новые знания о взаимодействии частиц энергий 1-20 МэВ с биологическими объектами. В тоже время, ***микропучковые ионно-лучевые инструменты*** позволяют проникнуть внутрь биологической клетки и изучить радиационные эффекты на микроскопическом уровне, проводить сканирующие спектроскопические исследования твердотельных объектов (в том числе, объекты микроскопического масштаба, предметы исторического наследия) на ***микроскопическом масштабном уровне, проводить ионное легирование*** микроскопических областей в полупроводниковых кристаллах (наноэлектроника и микросистемная техника).

Информация о нейтрон-ядерных взаимодействиях крайне важна как для фундаментальной, так и для прикладной физики. Отсутствие у нейтрона электрического заряда делает его уникальным зондом для исследования ядерных сил. Обусловленная электрической нейтральностью высокая проникающая способность нейтронного излучения делает перспективным его применение для изучения структуры вещества как на ядерном, так и на молекулярном уровнях. Нейтроны широко используются и в прикладных целях: в досмотровых комплексах, установках неразрушающего элементного анализа, в устройствах для исследования ближайшего окружения буровых скважин (каротажа), а также, при создании детекторов нейтронов и гамма-квантов, используемых на борту орбитальных и спускаемых космических аппаратов для анализа грунта и атмосферы небесных тел. Сведения о нейтрон-ядерных реакциях необходимы и для проектирования перспективных ядерно-энергетических установок, а также для моделирования различных приборов и объектов, так или иначе взаимодействующих с нейтронным излучением. Показателем актуальности исследования характеристик нейтрон-ядерных взаимодействий может служить то, что список наиболее востребованных ядерных данных по большей части состоит из запросов, напрямую связанных с нейтрон-ядерными реакциями.

Таким образом, в настоящий момент имеется широкий спектр актуальных для ряда отраслей народного хозяйства прикладных и фундаментальных научных задач, которые сопряжены с ядерными реакциями на быстрых нейтронах и взаимодействием высокоэнергетических заряженных частиц с живой и неживой материей. Эти задачи требуют для своего решения использования электростатических ускорителей (ЭСУ).

2.2.1. Научная программа группы ЭГ-5. В ПТП ОИЯИ сформулировано три основных направления, которые мы планируем развивать с использованием электростатического ускорителя.

1. Ядерная физика. (Исследование свойств возбужденных ядер, реакций, в том числе, с вылетом заряженных частиц, физики деления, получения актуальных данных для астрофизики, ядерной энергетики и проблемы трансмутации ядерных отходов с помощью нейтрон- и гамма индуцированных реакций).

2. Физика конденсированного состояния (нанотехнологии, радиационное материаловедение, биологические исследования с использованием ионизирующего излучения различной природы, индуцируемого с помощью ЭСУ).

3. Прикладные и методические исследования (применение методов нейтронной физики в технологии (микроэлектроника), применение ускорительных методов в порошковых нанотехнологиях, других областях науки и техники).

Ядерная физика. Перспективная (потенциально возможная) научная программа ускорительного комплекса очень насыщена. Предполагается исследование целого спектра ядерных реакций с быстрыми квазимоноэнергетическими нейтронами, включая:

- исследование деления быстрыми нейтронами: измерения спектров *мгновенных нейтронов деления* (МНД) и полных кинетических энергий (ТКЕ) в реакциях $^{235}U(n,f)$, $^{238}U(n,f)$, $^{237}Np(n,f)$ в области энергий нейтронов 1-5 МэВ/ядро;
- исследование множественности МНД в этих реакциях на быстрых нейтронах в геометрии с высокой эффективностью регистрации МНД;
- измерение спектров заряженных частиц из реакций (n,α) и (n,p) в зависимости от энергии нейтронов в области до 5 МэВ и выше;
- измерение интегрального и дифференциального сечений этих реакций в зависимости от энергии нейтронов;
- исследование спектра и угловых распределений заряженных частиц при энергии нейтронов ~20 МэВ с целью изучения нестатистических эффектов;
- изучение реакций (α, n) и (p, n) в сочетании, соответственно, с реакциями (n, α) и (n,p);
- исследование упругого и неупругого рассеяния быстрых нейтронов атомными ядрами, измерение выходов гамма-квантов, излучаемых продуктами реакций;

Физика конденсированных сред. С использованием электростатического ускорителя запланированы исследования:

- глубинных элементных профилей приповерхностных слоев твердых тел (многослойные полупроводниковые архитектуры типа TiO_2 / SiO_2 / Si, SiO_2 / TiO_2 / Si, GaAs и др.);
- процессов структурной релаксации поверхностных слоев твердых тел, сопровождающихся окислением или гидрогенизацией (металлические (Fe, Cu) и металл-оксидные (ZrO_2, CuO, ZnO, SnO_2) твердые растворы - керамики и др)
- исследования кислородной подсистемы поверхностных слоев материалов по методу ядерных реакций (E >3,1МэВ, NRA);
- **Нанотехнологические исследования** и перспективные разработки. С использованием ускорительных методов совместно с партнерскими организациями и рабочими группами из Узбекистана, Казахстана, Египта, Турции и Сербии запланированы исследования и модификация физических свойств наноразмерных систем на основе оксида циркония (YSZ) с комбинированной 2D/3D электронной структорой (материалы типа «поверхность в объеме») в аспекте ядерно-физических и нейтронно-ядерных применений. В частности, планируется разработка нанопорошкового ПЧД детектора полей ионизирующих излучений, использующих принцип радиолиза адсорбированной влаги, приборов неполупроводниковой (гомогенной) электроники, способной работать в условиях интенсивных нейтронных полей, адсорбционных гидроэлектрических преобразователей, бионических систем электронного обоняния и др. приборов, в основе которых лежат эффекты низкоразмерного состояния вещества. Использование ЭСУ ЭГ-5 позволяет проводить модификацию электронной структуры наночастиц и наноструктурированных материалов. Это создает принципиальную основу для управления физическими свойствами наноструктурированных объектов.

Также планируются работы с биологическими объектами, в частности, исследование воздействия атмосферных нейтронов на мутации живых организмов на примере культур риса, тритикале и др., мониторинг хромосомных аберраций в лимфоцитах крови человека.

Предполагается (в перспективе) развитие новых методов элементного анализа материалов, в частности, с использованием неупругого рассеяния нейтронов, а также, комбинации ядерно-физических и других методов исследования поверхности материалов.

Научные и методические исследования требуют развития методов обработки данных, постановки экспериментов и экспериментальной инфраструктуры, необходимых для проведения научных работ с использованием техники ЭСУ.

2.2.2. Уникальные возможности ускорителя. Созданный на основе генератора Ван де Граафа электростатический ускоритель ЭГ-5 стационарно действует в ЛНФ с 1965 года. Благодаря относительной простоте и надежности конструкции а, так же характерным для одноступенчатых электростатических ускорителей уникальным параметрам ускоренного ионного пучка (высокая пространственная и энергетическая стабильность при относительно большом токе), ускоритель ЭГ-5 в настоящий момент безальтернативно остается наиболее эффективным и удобным ядерно-физическим инструментом для решения широкого спектра актуальных научных задач физики ядра, физики конденсированных сред, биологии, электроники, медицины. Относительно высокий ток ионного пучка (до 30мкА) позволяет получать в результате облучения дейтериевой мишени дейтронами (реакция $D(d,n)^3He$) широкий спектр нейтронов для ядерно-физических исследований в области энергий до 5,5 МэВ. Как видно из списка наиболее актуальных задач современной ядерной физики (Nuclear Data High Priority Request List, Табл. 1), данный диапазон энергий является наиболее востребованным в современных исследованиях физики ядра. Следует отметить, что эти задачи трудно и дорого решать на других типах нейтронных установок.

Таблица 1.

Список актуальных задач современной ядерной физики «Nuclear Data High Priority Request List» [2].

ID	View	Target	Reaction	Quantity	Energy range	Sec.E/Angle	Accuracy	Cov Field
2H		8-O-16	(n,a),(n,abs)	SIG	2 MeV-20 MeV		See details	Y Fissi
8H		1-H-2	(n,el)	DA/DE	0.1 MeV-1 MeV	0-180 Deg	5	Y Fissi
15H		95-AM-241	(n,g),(n,tot)	SIG	Thermal-Fast		See details	Fissi
18H		92-U-238	(n,inl)	SIG	65 keV-20 MeV	Emis spec.	See details	Y Fissi
19H		94-PU-238	(n,f)	SIG	9 keV-6 MeV		See details	Y Fissi
21H		95-AM-241	(n,f)	SIG	180 keV-20 MeV		See details	Y Fissi
22H		95-AM-242M	(n,f)	SIG	0.5 keV-6 MeV		See details	Y Fissi
25H		96-CM-244	(n,f)	SIG	65 keV-6 MeV		See details	Y Fissi
27H		96-CM-245	(n,f)	SIG	0.5 keV-6 MeV		See details	Y Fissi
32H		94-PU-239	(n,g)	SIG	0.1 eV-1.35 MeV		See details	Y Fissi
33H		94-PU-241	(n,g)	SIG	0.1 eV-1.35 MeV		See details	Y Fissi
34H		26-FE-56	(n,inl)	SIG	0.5 MeV-20 MeV	Emis spec.	See details	Y Fissi
35H		94-PU-241	(n,f)	SIG	0.5 eV-1.35 MeV		See details	Y Fissi
37H		94-PU-240	(n,f)	SIG	0.5 keV-5 MeV		See details	Y Fissi
38H		94-PU-240	(n,f)	nubar	200 keV-2 MeV		See details	Y Fissi
39H		94-PU-242	(n,f)	SIG	200 keV-20 MeV		See details	Y Fissi
41H		82-PB-206	(n,inl)	SIG	0.5 MeV-6 MeV		See details	Y Fissi
42H		82-PB-207	(n,inl)	SIG	0.5 MeV-6 MeV		See details	Y Fissi
45H		19-K-39	(n,p),(n,np)	SIG	10 MeV-20 MeV		10	Y Fusio
97H		24-CR-50	(n,g)	SIG	1 keV-100 keV		8-10	Y Fissi
98H		24-CR-53	(n,g)	SIG	1 keV-100 keV		8-10	Y Fissi
99H		94-PU-239	(n,f)	nubar	Thermal-5 eV		1	Y Fissi
102H		64-GD-155	(n,g),(n,tot)	SIG	Thermal-100 eV		4	Y Fissi
103H		64-GD-157	(n,g),(n,tot)	SIG	Thermal-100 eV		4	Y Fissi
114H		83-BI-209	(n,g)Bi-210g,m	BR	500 eV-300 keV		10	Y ADS,F
115H		94-PU-239	(n,tot)	SIG	Thermal-5 eV		1	Y Fissi
116H		3-LI-0	(d,x)Be-7	SIG	10 MeV-40 MeV		10	Y Fusio
117H		3-LI-0	(d,x)H-3	SIG,TTY	5 MeV-40 MeV		10	Y Fusio
118H		68-ER-167	(n,g)	SIG,RP	0.01 eV-100 eV		2	Y Fissi
119H		17-CL-35	(n,p)	SIG	100 keV-5 MeV		5-8	Y Fissi

Исследования индуцированных нейтронами реакций с вылетом заряженных частиц дают ценную информацию о механизмах протекания ядерных реакций и структуре атомного ядра, процессах звездного нуклеосинтеза и т.д.

Наиболее уникальное свойство одноступенчатого ускорителя – высокая энергетическая стабильность (свыше 0,01%) ионного пучка, а так же, возможность плавной регулировки энергии позволяет с очень высокой точностью проводить исследования элементного состава поверхностных слоев материалов методами ионно-лучевого анализа (ИЛО) и обусловливает возможность создания на основе ЭГ-5 уникального микропучкового спектрометра с диаметром пучка менее 1мкм. Такие пучки не могут быть получены, например, на популярных сейчас перезарядных ускорителях – тандетронах. Энергетическая стабильность, обусловленная отсутствием перезарядной мишени, является важным фактором для достижения высокой разрешающей способности в исследованиях тонких поверхностных слоев. В качестве ограничивающих развитие микрозондов на других источниках излучения факторов следует отметить невозможность реализации методов ИЛО (PIXE, RBS, NRA и др.), а так же, сложность создания зондоформирующих систем для ионных пучков более высоких (МэВ-ных) энергий. Технологические трудности, основанны на жестких требованиях, предъявляемым к самим квадрупольным линзам и системе их юстировки. Поэтому установки ядерного сканирующего микрозонда (ЯСМЗ) нашли свое развитие в лабораториях, которые имели доступ к ЭСУ с энергией до 3,5МэВ на высоковольтном терминале (Приложение 9).

2.2.3. Проблема, на решение которой направлен проект. Технической проблемой является невозможность достижения предельного напряжения на кондукуторе 4,1 МэВ и невозможность повышения тока ионного пучка до 100 мкА, недостаток инженеров для обеспечения полноценного выполнения проекта и работы ускорительного комплекса в перспективе минимум 3-х семилеток; недостаточное укомплектование экспериментальной инфраструктуры ускорительного коплекса; отсутствие условий для открытия пользовательской программы на ЭСУ ЭГ-5.

2.2.4 Задачи проекта и мероприятия, предполагаемые к проведению для их решения.

Задача 1. Главной технической задачей проекта является достижение технологических параметров ускорителем ЭГ-5: напряжения на кондукторе 4,1 МВ при токе пучка до 100 мкА. (Задача 1). Решение задачи 1 предполагает комплексную проверку, чистку и ремонт элементов высоковольтной структуры и оборудования, обеспечивающего высокое напряжение на кондукторе ускорителя, замену устаревших приборов управления ионным пучком, модернизация вакуумной системы.

Подзадача 1.1. (**Высоковольная система**). За время проведения модернизации были устранены все существовавшие дефекты и «слабые места» в механических и электронных узлах ускорителя, что позволило добиться расчетных на момент запуска в 1965 году (подтверждается документами) параметров работы ускорителя по току и на 85% по напряжению на кондукторе. Однако, для того, что бы добиться заявленных в проекте параметров по току свыше 100мкА и по напряжению 4,1 МВ требуется проведение следующих технических мероприятий.

- Замена ионного источника с системой управления (с оптоволоконным каналом связи) позволит увеличить ионный ток до 100мкА и провести частичную автоматизацию ЭСУ (1);
- Ремонт помещений, в которых находятся системы ускорительного комплекса позволит беспечить достаточный уровнь чистоты воздуха (класс ISO-9) что бы снизить степень загрязнения высоковольтных элементов ЭСУ и избежать выхода из строя элементов высоковольтной структуры в процессе эксплуатации (2).

Подзадача 1.2. (**Проводка ионного пучка**)

- Подключение нового источника питания аналитического магнита (ЭМА) даст возможность повысить стабильность пучка по энергии, сократить потери по току и провести частичную автоматизацию системы проводки ионного пучка (3).

- Подключение чиллеров для охлаждения ЭМА, сократит подготовительное время запуска ускорителя и за счет равномерного поддержания температуры магнита, независимо от температуры проточной воды и климата в помещении, даст прибавку к стабильности пучка (4).

Подзадача 1.3. (**Вакуумная система**) Замена масляных вакуумных насосов на более производительные безмасляные позволило обеспечить необходимую чистоту каналов, поднять максимальный вакуум в ионопроводах до 5^{-7}mbar.

- Замена масляных откачных насосов ГБО, производящих откачку «Котла» сократит с 2х дней до 2х часов время выведения ЭСУ в рабочий режим и позволит повысить раболее напряжение на кондукторе ЭСУ (с 3,5 до 4,1 МВ) за счет повышения диэлектрической проницаемости газа с внешней стороны УТ, повысит производительность ЭСУ в целом (5).

Подзадача 1.4. (**Автоматизация**). Задача автоматизации систем ускорителя ЭГ-5 предполагает комплекс технических и организационных мероприятий, в частности,

- подготовка соответствующий проекта (6) и

- проведение работ по автоматизации техническийх систем ускорителя (7) совместно с сотрудниками группы ИРЕН компанией «Спецатомсервис». В рамках решения подзадачи 1.4.

- Будут установлены датчики параметров состояния систем и исполнительные механизмы. Все сигналы будут сведены в единую базу данных и будут обрабатываться специальной программой на центральном компьютере комлекса.

- Будет разработана специальная программная оболочка на центральном компьютере управления (8). Часть информационных каналов, в частности, сигналы от турбомолекулярных насосов, электронных вакуумметров, термометров, блока управления аналитическим магнитом могут быть использованы в настоящий момент, но большая часть работы по сбору информации о физических процессах в системах ЭСУ (температура рабочих жидкостей, давление в баллонах, напряжения в контрольных точках и др.) и задача установки исполнительных устройств (электромагнитные шиберы, редукторы давления и др.) требуют решения. Автоматизация в перспективе позволит сократить количество персонала в смене и перейти на планируемый круглосуточный режим работы ЭСУ.

Задача 2. Не менее важной задачей является **развитие экспериментальной инфраструктуры** ускорительного комплекса, что позволит максимально использовать его производственный потенциал, повысить выход научной продукции и расширить область применимости имеющихся исследовательских методов.

Подзадача 2.1. (**Оборудование экспериментальных залов**) – проверка работоспособности и приведение в надлежащее функциональное состояние экспериментальной инфраструкутуры ускорительного комплекса.

Камера спектрометров ИЛА. Оборудование, используемое в настоящий момент для исследований элементного состава материалов устарело в моральном плане. Современные ионно-лучевые спектрометрические измерительные системы имеют существенно более высокую производительность. С целью повысить эффективность исследований объектов и выход научной продукции, предлагается существенно модернизировать камеру ионно-лучевого анализа (ИЛА, методы RBS, ERD, NRA и PIXE)

- путем замены системы загрузки образцов (роботизированный манипулятор) (9),

- доработки вакуумной системы (установки ТМН непосредственно на корпус камеры, (10)),

- удаление оборудования, создающего низкочастотные вибрации из стойки, на которой расположена камера ИЛА – спектрометров, установка основания стойки на вибростойкий фундамент (11). Это позволит увеличить производительность камеры, энергетическое разрешение спектрометров RBS, ERD, NRA, полностью автоматизировать процесс съемки образцов и обработки данных.

Подзадача 2.2 **Лаборатория для изготовления образцов.** В рамках решения **Задачи 2** так же планируется ремонт помещений специализированной лабораториидля подготовки объектов исследования, расположенной в здании 120 ЛНФ.

- В частности, планируется дооснащение химической лаборатории и инжинирингового центра для подготовки и структурных исследований образцов различных материалов (12) (Приложение 7). Лаборатория предназначена для выполнения работ по подготовке экспериментальных образцов в виде монолитных объектов, тонких и толстых пленок из широкого спектра твердотельных материалов, включая порошковые, для исследований ядерно-физическими методами RBS, ERD и PIXE. Такая лаборатория существенно повысит оперативность получения научных данных и значительно расширит возможности ускорительного комплекса по объему проводимых научных исследований и спектру следуемых объектов. Фактически комплекс ЭСУ ЭГ-5 будет иметь полный цикл: получение объекта исследования - модификация ионным пучком – исследование физических свойств и установление радиационных эффектов. Планируется оснастить новую лабораторию методиками, комплементарными ядерно-физическим методам исследования, в частности, методами исследования электрических, оптических и электронных свойств поверхности и приповерхностных слоев исследуемых объектов (методы спектроскопии электрохимического импеданса; вольтамперометрии, эллипсометрии). Лаборатория позволит проводить коррекцию и подготовку образцов на месте, проводить независимые исследования, сопряженные с исследовательскими методами ускорительного комплекса на базе ЭСУ ЭГ-5.

Подзадача 2.3 (**Организационные мероприятия**). Сбор комплекта документов, получение разрешительных документов и ввод в эксплуатацию ЭСУ ЭГ-5 (13). В настоящий момент практически все разрешительные документы для возобновления работы ЭСУ имеются, за исключением проекта установки нового компрессора ГБО (задерживает ООО «Промэкспертиза»). Данный вид работ проводится совместно с сотрудниками установки ИРЕН.

Следует отметить, что обеспечение надлежащего уровня **безопасности работы** с ускорителем и элементами его инфраструктуры, пожарной и радиационной безопасности также входит в подзадачу 2.3.

Задача 3 Подзадача 3.1. предполагает закладку кадрового потенциала, который обеспечит продуктивную работу ускорителя на наработку научной продукции в перспективе 20 лет.

- Предполагается расширение технической группы до 12 человек, обучение сотрудников ионно-лучевым методам исследования материалов и сервисному обслуживанию ускорителя (подзадача 3.1.) (13).

2.2.5. Ожидаемые результаты. В результате выполнения Проекта будет возобновлена работа ЭСУ ЭГ-5 в качестве базовой установки ОИЯИ на физический эксперимент. Технические параметры ускорителя ЭГ-5 до и планируемые к получению после модернизации приведлены в Табл.2. Методические возможности ускорительного комплекса до и после выполнения проекта модернизации пориведены в Табл.3.

1. Высоковольтная система. В результате выполнения Проекта в 2027г будет установлен новый СВЧ ионный источник на имеющуюся ускорительную трубку (УТ), за счет чего будет достигнут максимальный ток ионного пучка порядка 100мкА (1). Будет установлена станция безмасляной откачки объема «котла» (2), в результате чего будет достигнуто напряжение на кондукторе порядка 4,1МВ. Так же, будет заменен азотный испаритель в газокомпрессорной установке (3) и проведен ремонт в зале ЭМА (4), котрые повысят качество высоковольтной системы ЭСУ. В результате проведения этих (1-4) мероприятий параметры ионного пучка достигнут уровня (4,1МэВ, 100мкА при энергетическом разбросе 500эВ), достаточного для реализации исследований реакций с быстрыми нейтронами и экспериментов по нейтронному радиационному материаловедению.

2. Система проводки пучка. Подключение нового источника питания аналитического магнита (ЭМА) и чиллеров в сиситемц охлаждения ЭМА, сократит подготовительное время запуска ускорителя и за счет равномерного поддержания температуры магнита, независимо от температуры проточной воды и климата в помещении, даст прибавку к стабильности пучка (5).

3. Автоматизация ЭСУ. Будет проведена автоматизация основных систем ускорителя, в частности, вакуумной системы, системы управления ИИ и системы проводки ионного пучка (6). Для чего будет разработан проект автоматизации и контроля технических систем ускорителя (7); проведена разработка и практическая реализация системы управления новым источником ионов с сотрудниками группы ИРЕН компанией «Спецатомсервис»(8), включая установку датчиков параметров состояния систем и исполнительных механизмов. Все сигналы будут сведены в единую базу данных и будут обрабатываться специальной программой на центральном компьютере комлекса.

- Будет разработана специальная программная оболочка на центральном компьютере управления (9), обрабатывающая в режиме реального времени сигналы от турбомолекулярных насосов, электронных вакуумметров, термометров, блока управления аналитическим магнитом, информацию о физических процессах в системах ЭСУ (температура рабочих жидкостей, давление в баллонах, напряжения в контрольных точках и др.)

4. Специализированная лаборатория для подготовки объектов исследования. В специализированной лаборатории для подготовки объектов исследования будет закончен монтаж электропроводки (10), косметический ремонт (11), установлен и введен в эксплуатацию электронный микроскоп STEM SE2000 (12), проведено техническое дооснащение химической лаборатории (13).

В частности, будет возобнослена работа газокомпрессорной станции (14). Техническая группа будет доукомплектована специалистами для реализации задач проекта и обеспечения бесперебойной работы ускорителя в процессе реализации пользовательской программы в перспективе 20лет (15). Кроме указанных мероприятий в 2027г будет проведена склейка новой УТ (16). После возобновления эксплуатации на ускорителе будут проводиться работы на физический эксперимент (порядка 100 часов в 2027г) (17), что обеспечит выполнение технических проектов, в частности, проекта с АО «Микрон» и с Госкорпорацией «РОСАТОМ» (согласование технического задания), а так же, частично выполнение научной программы по теме 1146 согласно ПТП ОИЯИ.

Таблица 2.

Технические параметры ускорителя ЭГ-5 до и после модернизации.

Before modernization	**After modernization**
Terminal voltage - 2,1 MV Beam current – 100nA Ion Energy – 2,5 MeV Neutron energies – 3.3-5,1MeV Neutrons yield: $5 \cdot 10^6$ n/s (gas target)	Terminal voltage - 4,1 MV Beam current – 100 mkA Ion Energy – 4,1 MeV Neutron energies – 20-800keV, 3.3-5,1MeV Neutrons yield: $5 \cdot 10^7$ n/s (gas target) and 10^9n/s (Li – target)

Таблица 3.

Методические возможности ускорительного комплекса до и после выполнения проекта модернизации.

Before modernization	**After modernization**
- Nuclear physics experiments - **not possible** - NRA (3,1 MeV) - **not possible**	Nuclear physics experiments - **possible**, - NRA (3,1 MeV) - **possible**.
Microbeam option installIng – **not possible**	Microbeam option installing – **possible**;
Work with biological objects - **not possible**	Work with biological objects - **possible**

The performance of EG-5 spectrometers: - **3** samples / per day, **Methods:** 1. Rutherford backscattering (RBS); 2. Elastic Recoil Detection (ERD); 3. Particle Induced X-Ray Emission (PIXE). 4. Nuclear Reaction Analysis (NRA);	The performance of EG-5 spectrometers: - **32** samples / per day, **Methods:** 1. Rutherford backscattering (RBS); 2. Elastic Recoil Detection (ERD); 3. Quantitative Particle Induced X-Ray Emission (PIXE). 4. Nuclear Reaction Analysis (NRA);
Complementary methods	**Complementary methods** 5. Fast neutron analysis (FNAA); 6. Neutron activation analysis (NAA); 7. Electrochemical impedance spectrometry (EIS); 8. Voltammetry (V-I); 9. Optical Ellipsometry (OE); 10. STEM electron microscope (STEM)

Модернизация ЭГ-5 в ОИЯИ, где имеются высококвалифицированные специалисты, хорошая детектирующая аппаратура и ценные наработки по исследованию атомных ядер нейтронами, даст возможность проведения в краткосрочной перспективе ряда новых, уникальных экспериментов по измерению энергетических спектров и угловых распределений заряженных частиц из реакций (n, α) и (n, p) / (α, n) и (p, n) и интегрального и дифференциального сечений последних в интервале энергий нейтронов до ~6 МэВ, процессов деления атомных ядер быстрыми нейтронами, активационного анализа [3 - 4], проведение экспериментов в области нейтронного материаловедения и др.

2.2.6. **Состояние исследований по заявленной проблеме (имеющийся задел)**

Ремонт ускорителя, проведенная работа. Для решения **задачи 1** руководством ЛНФ до начала проекта было проведено ряд мероприятий (консультационного характера), направленных на выявление причин потери ускорителем работоспособности и путей устранения выявленных технических проблем. По заказу ЛНФ группой экспертов из Института прикладной физики НАНУ (Сумы, Украина), специализирующейся на разработке ускорительной техники под руководством проф. А.Г. Пономарева была проведена научно-техническая работа «Анализ технического состояния и измерение параметров электростатического ускорителя ЭГ-5 ЛНФ ОИЯИ», позволившая установить основные причины снижения эффективности работы ускорителя. Независимо, ведущим экспертом в области ЭСУ проф. Романовым В.А. по месту было проведено исследование режимов работы и технического состояния основных узлов установки. Полученные рекомендации были положены в основу плана работ по ремонту ускорителя (**Задачи 1**). Было проведено ряд мероприятий, направленных на улучшение физического состаяния основных функциональных систем ЭСУ (см. Отчеты за 2022- 2023 и 2024 – 2026гг в приложении 4). В результате были достигнуты технические параметры ЭСУ, сравнимые с параметрами на момент введения его в эксплуатацию в 1965г.

Были проведены мероприятия технического и организационного харктера, необходимые для устранения причин запрета эксплуатации ГБО ЭСУ от 2014г и помещений ЭСУ ввиду истечения срока действия сертификата СЭЗ. В результате проведенной организационной работы был получен Сертификат СЭЗ на помещения ЭСУ. В настоящий момент все системы ЭСУ кроме ГБО могут работать в отладочном режиме. Возобновление работы станции ГБО упирается в проект установки компрессора, который сейчас находится в разработке компанией ООО «Промышленная экспертиза»

Новая камера ИЛА – спектрометров была изготовлена, но не установлена в магистарь ускорителя на место старой. Требуется отладка и испытание новой камеры, доработка

спектрометрического комплекса согласно перечню мероприятий, указанных в пункте «Задачи проекта и мероприятия, предполагаемые к проведению для их решения».

Помещения химлаборатории, исследовательского и инжинирингового центров в злании 120 площадки ЛЯП были приведены в надлежащий пордок. Проведен косметический ремонт помещений, включающий замену дверей и окон, ремонт полов. В настоящий момент идет электрификация помещений исследовательского и инжинирингового центров. Химлаборатория функционирует в обычном режиме. Для химлаборатории частично закуплено оборудование, в частности, лабораторная мебель, общелабораторное химическое оборудование, высокотемпературная печь, вакуумный сущильный шкаф, УЗ- ванна, Установка для нанесения тонкиз пленок, ИК – спектрометр, pH - метр и др. Проведена оплата электронного микроскопа HD 2000 (Hitachi), проведена организация доставки микроскопа из Владивостока.

Сектор СЯФМИН. Для решения поставленных в проекте задач в сектор СЯФМИН был приглашен эксперт мирового уровня в области техники ЭСУ Таскаев С.Ю. Кроме того в составе сектора имеется высококлассные инженерно-технические работники (И.А. Чепурченко, А.Н. Лихачев, С.В. Ткаченко, И.А. Зайцев, К.Е. Студнев, Н.А. Кругляк) из состава Группы №1 научно-технического сопровождения ядерно-физического эксперимента (ГНТСЯФЭ). Научнй персонал сектора активно работает в области радиационного материаловедения и порошковых нанотехнологий. Ежегодно публикуется более 25 научных статей в рецензируемых журналах, третья часть из которых – в рейтинговых журналах квартилей Q1 и Q2 (Приложение 4). На финальных стадиях формирование ускорительного комплекса, включающего ускоритель с эксприментальной инфраструктурой научный и технический персонал, а так же, специальную лабораторию для подготовки объектов исследования.

2.2.7. Описание предлагаемого исследования / Описание хода работ в 2026-2027гг

1. Проведение мероприятий для повышения безопасности работ с ускорителем и организационные мероприятия

1.1. Получение проекта СРК и СБиС – 01.06.2026
1.2. Комиссионный ввод в эксплуатацию централизованной системы радиационного контроля в залах ЭСУ и помещениях контролируемой зоны. – 15.06. 2026г.
1.3. Приказ на возобновление эксплуатации ЭСУ ЭГ-5 (без газокомпрессорной станции) в тестовом режиме – 16.07.2026
1.4. Получение проекта установки компрессора *(компания «Промэкспертиза»)* - 30.11.2026.
1.5. Комиссионная приемка газокомпрессорной станции - 15.12.2026
1.6. Приказ о введении в эксплуатацию газокомпрессорной станции – 20.12.2026
1.7. Возобновление эксплуатации ЭСУ - 10.01.2027.
1.8. Покраска ионопровода в Правом экспериментальном зале в яркую краску. 01.02.2027.
1.9. Установка защиты и сигнализации потенциально опасных мест в Правом Зале ускорителя - 01.02.2027.

2. Проведение мероприятий по повышению электрической прочности газовых сред ускорителя, включая воздух в помещениях

2.1. Ремонт и приведение служебных помещений ускорителя (Зал ЭМА) в соответствие санитарным нормам -- 01.12.2026.
2.2. Установка входных газовых фильтров в систему подготовки диэлектрического газа. Замена системы осушки изолирующего газа.- 01.02.2027.
2.3. Замена низковакуумного насоса откачки «котла» безмасляной откачной станцией - 15.01.2027.
2.4. Замена азотного испарителя в газокомпрессорной установке. 15.10.2027

3. Устранение факторов, ухудшающих качество работы установки (снижающих предельное напряжение и ток пучка, увеличивающих энергетический разброс), проведение подготовительных мероприятий к замене высоковольтной ускоряющей трубки

3.1. Регулировка (строго в одной плоскости) и частичная замена игл в коронирующем триоде. --01.02.2027.

3.2. Изменение конфигурации перезарядных щеток: разделение монолитных пластин на три секции, что позволит снизить давление на ленту и ее износ - 01.02.2027.

3.3. Замена ионного источника с помощью специалистов из Института ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН - 15.06.2027.

3.4. Проверка формы пучка на входе и на выходе ускорительной трубки - 17.07.2027.

3.5. Согласование ионной оптики ЭСУ с новыми УТ и ИИ с помощью специалистов из Института ядерной физики имени Г.И.Будкера СО РАН - 01.08.2027.

3.6. Подключение и интеграция в общую базу данных сигналов от Источника тока магнита СП-88. - 01.04.2027.

3.7. Подключение системы форвакуумного накопителя - 01.02.2027.

3.8. Подключение системы охлаждения магнита СП-88 - 01.04.2027.

3.9. Установка редуцирующих устройств на линию наполнения «раздаточная рампа»-«котел» - 01.02.2027.

4. Ревизия пультовой ЭГ-5. Составление реальной электричекой схемы с учетом многочисленных переделок и доработок, замена морально устаревших приборов – 31.12.2028.

5. Проведение работ по автоматизации систем ЭСУ ЭГ-5

5.1. **Замена трубопровода системы охлаждения магнита ЭМА** (установка потокомеров, термодатчиков с уставкой аварийных состояний, автоматической запорной арматуры, установка системы удаленного управления основным и резервным чиллерами) - 01.02.2027.

5.2. Вакуумная система - 31.12.2027.

- Установка управляемых электромагнитных шиберов. - 01.02.2027.
- Сведение в единую автоматизированную систему всех элементов существующей вакуумной инфраструкутры подготовка программной оболочки (9 турбомолекулярных насосов, 6 форвакуумных насосов и форвакуумную систему для турбомолекулярных насосов в зале ЭМА состоящую из форбака и двух форнасосов, шибера на ионопроводах и клапана на турбомолекулярных насосах) соответствующего программного обеспечения. - 31.12.2027.

5.3. Автоматизация системы проводки пучка и наблюдения - 31.12.2027.

- Механизация ПНиПов (система ключает в себя 9 ПНиПов), которые используются для перекрытия пучка и съёма значения тока ионного пучка (31.12.2027).

5.4. Автоматизация истемы запуска и управления двигателем заряд-транспортной ленты. - 01.02.2027.

5.5. **Установка датчиков и сведение в единую систему параметров зарядки заряд-транспортной ленты** (контроль состояния (ток и напряжение), удаленное управление (включение, установка тока зарядки ленты)) - 31.12.2027.

5.6. **Установка датчиков и сведение в единую базу данных параметров системы управления аналитическим магнитом в зале ЭМА** по протоколу RS-485 (контроль состояния (включено, включено), контроль рабочих параметров (ток и напряжение), удаленное управление на включение и установку рабочего тока) - 01.07.2027.

5.7. **Установка датчиков и сведение в единую базу данных параметров системы управления** раздаточными магнитами в Правом и Левом экспериментальных залах по протоколу RS-485 (контроль состояния (включено, включено), контроль рабочих

параметров (ток и напряжение), удаленное управление на включение и установку рабочего тока). - 31.12.2027.

5.8. **Автоматизация системы управления электростатическим корректором** (контроль состояния положения пучка по напряжению на пластинах (2 пары пластин после корректора), управление потенциалом на электростатических линзах и корректоре). - 01.02.2027.

5.9. **Установка системы управления ионным источником** (контроль скорости натекания газа в ионный источник, выбор и регулировка натекания газа в ионный источник (управление натекателями на три канала в зависимости от ускоряемых частиц). - 15.11.2027.

5.10. **Автоматизация системы управления перезарядной ленты** (увеличение или уменьшение напряжения перезарядки ленты в зависимости от параметров зарядки ленты). - 01.02.2027.

5.11. **Автоматизация системы управления квадрупольной линзы** (правый и левый ионопровод в зале ЭМА, контроль тока и напряжения, удаленное управление на включение и установки рабочего тока). - 31.12.2027.

5.12. **Автоматизация системы контроля энергии ускоряемых частиц, контроль тока делителя** (оцифровка, отображение на панели оператора и запись данных, как контроль работы стабильности энергии по времени) - 31.12.2027.

5.13. **Автоматизация системы управления стрелой и стабилизации энергии пучка** (контроль тока стрелы (управление положением стрелы для установки рабочей энергии ускоряемых частиц, вывод осциллограммы для контроля прохождения пучка и качество его стабилизации). - 01.08.2027.

5.14. **Автоматизация системы стабилизации тока магнита по ЯМР** (удаленное управление и отображение стабилизации тока магнита по ЯМР на панели оператора). - 01.09.2027.

5.15. Автоматизация системы управления поворотными дверьми (Левый **экспериментальный зал и зал ЭМА).** - 01.02.2027.

5.16. Автоматизация системы позиционирования и пространственной стабилизации пучка - 01.12.2027.

5.17. Установка системы контроля координат пучка с документальной фиксацией 31.12.2027.

5.18. **Подготовка программного обеспечения для обработки сигналов с датчиков функциональных систем ЭСУ и управления исполнительными устройствами.** 31.12.2027.

5.19.

6. **Укомплектование оборудованием лаборатории для поготовки объектов исследований методами ИЛА** - 31.12.2027.

6.1. Введение в эксплуатацию электронного микроскопа - 01.06.2027.

6.2. Закупка и установка лабораторного оборудования - 01.02.2027.

6.3. Ремонт и введение в эксплуатацию рентгеновских укстановок - 31.12.2027.

7. **Интегрирование оборудования для ионной имплантации пластин кремния «Днепр» от АО «Микрон» в единую ускорительную инфраструктуру** - 01.02.2027.

8. **Установка новой высокопроизводительной камеры для ионно-лучевых исследований материалов (RBS, ERD, PIXE).** - 01.02.2027.

9. **Подготовка персонала для работы на установке из числа молодых сотрудников, интенсификация международного сотрудничества.** Расширение штата технической группы для обеспечения реализации плана модернизации до 12 человек (минимально необходимое количество персонала для проведения ремонтных работ и автоматизации, обучение управлению ускорителем, выход в дальнейшем на круглосуточный режим работ) -01.06.2027г.

2.2.8. Краткий ССВУ - анализ проекта

Сильные стороны проекта.

1. Подходящая конструкция ускорителя ЭГ-5 для решения поставленных задач (создание ядерного микрозонда и нейтронного генератора). В проекте будут в полной мере реализованы уникальные возможности ускорителя ЭГ-5, в частности, возможность получения большой величины тока ионного пучка (до 100мкА) и его малого разброса (<500эВ), что не может быть реализовано на установках тандемного типа.

2. Низкая эксплуатационная стоимость установки ЭГ-5. Отличная ремонтопригодность конструкции ускорителя ЭГ – 5 и наличие ресурсной базы позволяют провести модернизацию с минимальными затратами и обеспечить автономную работу ускорительного комплекса в течение длительного времени. В ОИЯИ имеется вся необходимая производственная инфраструктура и материальная база (запзачасти, жидкий азот, сервисные системы и т.д.) для поддержания своими силами работоспособности установки продолжительный период времени после замены трубки. ЭГ-5 не требует использования дорогостоящих материалов и оборудования, не содержит узлов с неизвестными параметрами (программируемые микропроцессорные модули системы управления сервисным оборудованием и т.д.), не требует для проведения ремонтов и сервисных работ приглашения иностранных специалистов.

3. Повышение квалификации собственных инженерных кадров в процессе модернизации, формирование кадрового потенциала на длительный срок эксплуатации ускорителя. В процессе реализации проекта будет проведено формирование кадровых ресурсов из выпускников ВУЗов, их обучение работе с элементами инфраструктуры ускорителя и ознакомление со спецификой научной работы в группе.

4. Развитие полноценной экспериментальной инфраструктуры ускорительного комплекса. Экономия ресурсов за счет наличия собственной инфраструктуры позволит направить средства на открытие новых направлений исследований. Установка обновленного комплекса ионно-лучевых спектрометров, монтаж лаборатории для формирования объектов исследования позволит существенно расширить спектр исследуемых объектов, чем - существенно повысить выход научной продукции.

Слабые стороны проекта.

1. Моральное и техническое устаревание сервисных систем и экспериментальной базы ускорителя. Потребуются значительные временные ресурсы для ревизии и модернизации всех систем ускорителя.
2. Не все системы в данный момент могут быть автоматизированы.

Основные риски, которые могут повлечь невыполнение поставленных задач в срок или недостижение требуемых технических параметров ускорителем могут быть связаны с:

- невыполнением обязательств по срокам сотрудничающими организациями;
- критическое рассогласование ионной оптики ЭСУ после замены элементов;
- наличием дополнительных неучтенных неисправностей в ускорителе помимо потери параметров ускорительной трубкой;

2.3. Предполагаемый срок выполнения составляет 1 год (31.12.2027г).

2.4. Участвующие лаборатории ОИЯИ - ЛНФ

2.4.1. Потребности в ресурсах МИВК - нет

2.5. Участвующие страны, научные и научно-образовательные организации

Организация	Страна	Город	Участники	Тип соглашения
Египетское управление по атомной энергии	Египет	Каир	**Египет:** Мостафа Салех Хосам Эль-Дин	Соглашение о сотрудничестве № 656 от 25.03.2026

			ОИЯИ: Дорошкевич А.С.	
Британский университет в Египте (BUE)	Египет	Каир	**Египет**: Салама Ахмед Эльсаид **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 657 от 25.03.2026
Институт ядерных наук Эгейского университета	Турция	Измир	**Турция**: Танйылдызы Шюкрю Ханифа **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 596 от 29.09.2025
Общество с ограниченной ответственностью «Поливуд»	РФ	Москва	**Москва**: Смолянский А.С. **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 594 от 29.09.2025
Обществом с ограниченной ответственностью «Квант-Р»	РФ	Москва	**Москва**: Смолянский А.С. **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 593 от 29.09.2025
Национальный музей Сербии	Сербия	Белград	**Сербия**: Милица Марич Стоянович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 577 от 01.09.2025
Бандирма Оньеди Эйлюл Университет (БОЭУ)	Турция	Бандирма	**Турция**: БУЮК Бюлент **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 409 от 26.08.2025
Центр исследований и перспективных исследований Национального политехнического института	Мексика	Сан-Педро-Сакатенко	**Мексика**: Юрий Кудрявцев **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 580 от 22.08.2025
Федеральным государственным бюджетным учреждением науки Институтом физики полупроводников им. А.В. Ржанова Сибирского отделения Российской академии наук «ИФП СО РАН» (ИФП СО РАН)	РФ	Новосибирск	**Новосибирск**: Тимофеев Вячеслав Алексеевич **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 547 от 26.06.2025
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта», Научно-образовательный центр «Функциональные наноматериалы»	РФ	Калининград	**Калининград**: Швец Пётр Валерьевич **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 518 от 17.04.2025

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им.П.Н. Лебедева Российской академии наук	РФ	Москва	**Москва**: Сошенко Владимир Владимирович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 130/2 от 24.03.2025
Региональная общественная организация содействия научно-технологическому и инновационному развитию «Русская инженерная школа»	РФ	Москва	**Москва**: Кибальников Сергей Владимирович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 479 от 06.02.2025
Институт физики, Национальный автономный университет Мексики	Мексика	Койоакан	**Мексика**: Чавес Ломели Эфреин Рафаэль **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 468 от 26.12.2024
Казахский научно-исследовательский институт рисоводства им. И. Жахаева (КазНИИ рисоводства им. И. Жданова)	Казахстан	Кызылорда	**Казахстан**: Тауипбаев Султанбек Тауипбаевич **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 439 от 05.11.2024
Государственное научное учреждение «Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси» (Республика Беларусь)	Беларусь	Минск	**Беларусь**: Гринчук Павел Семенович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 428 от 07.10.2024
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС)	РФ	Москва	**Москва**: Лагов Пётр Борисович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 418 от 26.09.2024
Уральский Федеральный университет имени первого президента России Б.Н. Ельцина	РФ	Екатеринбург	**Екатеринбург**: Зацепин Анатолий Федорович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 415 от 05.09.2024
Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз	Узбекистан	Ташкент	**Ташкент**: Сулейманов Султан Хамидович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 404 от 22.08.2024
ФГБОУ ВО «Университет «Дубна»	РФ	Дубна	**Университет**: Немченок Игорь Борисович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 404 от 22.08.2024
Институт Радиационных Проблем Министерство Науки	Азербайджан	Баку	**Азербайджан**: Мирзаев	Соглашение о

и Образования Азербайджанской Республики (ИРП МНОАР)	ская Республика		Матлаб Наби оглы **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	сотрудничестве № 410 от 19.08.2024
Государственное научное учреждение «Институт общей и неорганической химии Национальной академии наук Беларуси»	Беларусь	Минск	**Беларусь**: Иванец Андрей Иванович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 408 от 16.08.2024
Гаванский университет	Куба	Гавана	**Куба**: Гонсалес Эдвин Педреро **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 379 от 13.06.2024
Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт лесной генетики, селекции и биотехнологии»	РФ	Воронеж	**Воронеж**: Семёнов Михаил Александрович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 356 от 11.06.2024
Институт материаловедения НПО «Физика-Солнце» АН РУз	Узбекистан	Ташкент	**Узбекистан**: Хамидович Султан Сулейманов **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 322/1 от 09.04.2024
Федеральное государственное бюджетное научное учреждением «Институт физико-органической химии и углехимии им.Л.М.Литвиненко»	РФ	Донецк	**Донецк**: Хомутова Екатерина Валерьевна **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 314 от 18.01.2024
Университет Нови Сад, Технологический факультет Нови Сад	Сербия	Нови Сад	**Нови Сад**: Весна Теофилович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 289 от 09.11.2023
Университет Белград, Институт ядерных наук “Винча”	Сербия	Белград	**Белград**: Йованович Зоран **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 289/1 от 09.11.2023
Кызылординский Университет им.Коркыт Ата	Казахстан	Кызылорда	**Кызылорда**: Аппазов Нурбол Орынбасарулы **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 286 от 01.11.2023
Институт Физической Химии и Электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской Академии Наук	РФ	Москва	**Москва**: Тамеев Алексей Раисович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 271 от 21.09.2023

АО «Специализированный научно-исследовательский институт приборостроения»	РФ	Москва	**Москва**: Ткачев Сергей Валерьевич **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 231 от 22.06.2023
АО «Микрон»	РФ	Москва	**Москва**: Шипигузов Артур Васильевич **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 160 от 28.03.2023
АО «Микрон»	РФ	Москва	**Москва**: Вренев Я. В. **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Договор на обработку пластин № 400-04515 от 30.06.2025
АО «Ангстрем»	РФ	Москва	**Москва**: Гаджиев Асадула Абдулмуслимович **ОИЯИ**: Дорошкевич А.С.	Соглашение о сотрудничестве № 13.02.2023/1 от 13.02.2023

2.6. Организации-соисполнители *(те сотрудничающие организации/партнеры без финансового, инфраструктурного участия которых выполнение программы исследований невозможно. Пример — участие ОИЯИ в экспериментах LHC в CERN)* – нет

3. Кадровое обеспечение

3.1. Кадровые потребности в течение первого года реализации (общее количество участников) – 25 (СЯФМИН)+6 (дополнительных специалистов в ГНТСЯФЭ) = 31 сотрудник.

№№ п/п	Категория работника	Основной персонал Сумма FTE	Ассоциированный персонал Сумма FTE
1.	научные работники	10,75	
2.	инженеры	5,5+6 (нужно принять дополнительно на работу)	
3.	специалисты	1	
4.	служащие	5,52	
5.	рабочие		
Итого:		**28,77**	

3.2. Доступные кадровые ресурсы

Коллектив проекта включает специалистов мирового уровня в области разработки ЭСУ – техники (проф. С.Ю. Таскаев), инженерно-технических работников с многолетним опытом обслуживания и ремонта всех узлов установки ЭГ-5, прочих специалистов. Группа содержит в своем составе более 50% молодых сотрудников, способных оперативно решать текущие технические задачи.

3.2.1. Основной персонал ОИЯИ

№	Категория	ФИО	Подразделение	Должность	FTE
1.	Научные работники				
		Зеленяк Т.Ю., Исаев Р.Ш.	ЛНФ	Младший научный сотрудник	1,5
		Перес-Морено А., Ибрагим М., Фортуне С., Алтынбасова А., Айрадеб А.	ЛНФ	Стажер - исследователь	5
		Мезенцева Ж.В., Алексеенок Ю.В. Фан Лыонг Туан	ЛНФ	Научный сотрудник	3
		Славкова З.Д.	ЛНФ	Старший научный сотрудник	1
		Кириллов А.К.	ЛНФ	Ведущий научный сотрудник	0,25
2.	Инженеры				
		Зайцев И.А., Кругляк А.И.	ЛНФ	Инженер	2
		Семенов В.Н.,	ЛНФ	Старший инженер	1.5

		Ткаченко С.Н.,			
		Лихачев А.Н., Ледо П.Л.,	ЛНФ	Ведущий инженер	2
3.	Специалисты				
		Ширшикова Т.Д.	ЛНФ	Специалист по работе с документами	1
4	Служащие				
		Копач Ю.Н.,	ЛНФ	Заместитель директора лаборатории по научной работе	0.1
		Швецов В.Н.	ЛНФ	Начальник отделения	0.1
		Седышев П.В.	ЛНФ	Заместитель начальника отделения	0.1
		Дорошкевич А.С.	ЛНФ	Начальник сектора	1
		Чепурченко И.А.	ЛНФ	Начальник группы	1
		Таскаев С.Ю.	ЛНФ	Советник при дирекции Лаборатории	0.22
		Татаринова А.А., Кругляк Н.А., Студнев К.Е..	ЛНФ	Лаборант	3
	Итого				22,77

3.2.2. Ассоциированный персонал ОИЯИ (общее количество участников) -нет

4. Финансовое обеспечение

4.1. Полная сметная стоимость проекта

Прогноз полной сметной стоимости (указать суммарно за весь срок, за исключением ФЗП): 250тыс долларов

Детализация приводится в отдельной форме.

4.2. Внебюджетные источники финансирования

Предполагаемое финансирование со стороны соисполнителей/заказчиков (общий объем). - нет

Руководитель проекта _____/ Дорошкевич А.С./

Дата представления проекта в ДНОД 12.05.2026

Дата решения НТС Лаборатории 24.04.26, номер документа №73

Год начала проекта 2027 – 2026

(для продлеваемых проектов) — год начала работ по проекту 2027

Предлагаемый план-график и необходимые ресурсы для осуществления Проекта

Наименования затрат, ресурсов, источников финансирования			Стоимость (тыс. долл.) потребности в ресурсах	Предложение лаборатории по распределению финансирования и ресурсов				
				1 год	2 год	3 год	4 год	5 год
		Международное сотрудничество (МНТС)						
		Материалы	95	95				
		Оборудование и услуги сторонних организаций	120	120				
		Пуско-наладочные работы	30	30				
		Услуги научно-исследовательских организаций						
		Приобретение программного обеспечения	5	5				
		Проектирование/строительство	0	0				
		Сервисные расходы						
Необходимые ресурсы	**Нормо-час**	Ресурсы						
		Сумма FTE	56734,4	56734,4				
		–ускорителя/установки,						
		–реактора						
Источники финансирования	**Бюджетные средства**	Бюджет ОИЯИ *(статьи бюджета)*	250	250				
	Внебюджет (доп.смета)	Вклады соисполнителей Средства по договорам с заказчиками Другие источники финансирования						

Руководитель проекта _____ / А.С. Дорошкевич /

Экономист Лаборатории _____ / Ж.В. Сорокина /

ЛИТЕРАТУРА

[1] ПТП ОИЯИ 2024г. https://plan.jinr.ru/2024/33-blog-2024/1563-03-4-1128-2017-2022

[2] Nuclear Data High Priority Request List [Электронный ресурс] // Сайт NEA Nuclear Energy Agency URL: https://www.oecd-nea.org/dbdata/hprl/search.pl?vhp=on.

[3] Комар Е. Г. Основы ускорительной техники. М., Атом-издат, 1978, с. 368.

[4] А.К. Вальтер. Электростатические ускорители заряженных частиц. Под редакцией академика АН УССР А.К. Вальтера., М., 1963 с. 302.

ЛИСТ СОГЛАСОВАНИЙ ПРОЕКТА

НАИМЕНОВАНИЕ ПРОЕКТА: Модернизация ускорителя ЭГ-5 и его экспериментальной инфраструктуры. Продление на 2027

УСЛОВНОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ПРОЕКТА: ЭГ-5

ШИФР ПРОЕКТА _____

ШИФР ТЕМЫ 03-4-1146-2024

ФИО РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА: А.С. Дорошкевич

СОГЛАСОВАНО:

ВИЦЕ-ДИРЕКТОР ИНСТИТУТА	_____ ПОДПИСЬ	С.А.Куликов ФИО	_____ ДАТА
ГЛАВНЫЙУЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ИНСТИТУТА	_____ ПОДПИСЬ	С.Н Неделько ФИО	_____ ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР	_____ ПОДПИСЬ	Б.Н.Гикал ФИО	_____ ДАТА
ДИРЕКТОР ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	Е.В. Лычагин ФИО	04.05.26 ДАТА
ГЛАВНЫЙ ИНЖЕНЕР ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	А.В. Виноградов ФИО	04.05.26 ДАТА
УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ ЛАБОРАТОРИИ	_____ ПОДПИСЬ	А.Ю. Незванов ФИО	04.05.26 ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ТЕМЫ	_____ ПОДПИСЬ	В.Н. Швецов ФИО	04.05.26 ДАТА
РУКОВОДИТЕЛЬ ПРОЕКТА	_____ ПОДПИСЬ	А.С. Дорошкевич ФИО	04.05.26 ДАТА

- в рамке подписывается после ПКК

ОДОБРЕН ПКК ПО НАПРАВЛЕНИЮ _____ ПОДПИСЬ _____ ФИО _____ ДАТА

Приложение 9

1. Краткий обзор мировой ускорительной инфрраструктуры и микропучковых установок.

Ускорительнапя инфраструктура: состояние на май 2026 г. [1, 2, 3, 4]. Согласно данным МАГАТЭ, представленным через **Accelerator Knowledge Portal** [5], мировая ускорительная инфраструктура остаётся концентрированной и насчитывает **578 действующих площадок**. Из них **60** классифицируются как **Synchrotron Light Sources**, а **324** — как **Electrostatic Accelerators**. Это означает, что ускорительная инфраструктура высокого уровня не является массовой: основная научная нагрузка сосредоточена в ограниченном числе крупных центров, а доступ к ним организуется через специализированные beamlines и пользовательские программы.

В настоящее время число различных микрозондов в мире неизменно увеличивается, расширяется область их применения, назначение и принципы действия (Конфокальный, Синхротронный, ускорительный). При этом альтернативы электростатическим ускорителям для исследования элементного анализа и глубинного элементного профилирования нет.

Области применения ядерных микрозондов. Ядерный сканирующий микрозонд (ЯСМЗ) позволяет определять распределение элементов в образце (проводить «картирование») с высокой чувствительностью на уровне одной части на миллион (1ppm). Принцип действия ЯСМЗ основывается на том, что сфокусированный ионный пучок с микрометрическими размерами сканируется по образцу и в каждой его позиции (пикселе) регистрируется информация об элементном составе в режиме event-by-event.

Так, основываясь на уникальных свойствах протонных пучков, разрабатывается технология экспонирования сфокусированным протонным пучком (PBW – proton beam writing) [6], которая относится к литографическим технологиям высокого разрешения. Отличительной особенностью этой технологии является возможность создания трехмерных наноструктур с высоким аспектным отношением (1:160) и гладкими вертикальными стенками. В связи с развитием космических аппаратов как гражданского, так и военного назначения интерес к ЯСМЗ вызван возможностью имитации повреждений устройств микроэлектроники высокоэнергетичными ионами космического происхождения [7]. Направление исследований с применением режима одиночных ионов, которое в настоящее время имеет широкое распространение, связано с радиационной биологией. Здесь преимущества применения ЯСМЗ основаны на высокой прицельной точности попадания одиночного иона в область интерфейса клеточной структуры, находящейся в естественных условиях вне вакуума [8].

С развитием нанотехнологий и приложений ядерной физики расширяется спектр прикладных исследовательских задач для электростатических ускорительных комплексов типа ЭГ-5. Ионно-лучевой «микрозонд» диаметром порядка 1мкм существенно расширяет возможности ядерно-физических методов, доступных ЛНФ ОИЯИ в области естественных наук, незаменим при решении задач нанофизики и бионанотехнологии. Таким образом, ЭГ-5, в настоящий момент является единственным в ОИЯИ ускорителем, который по своим техническим возможностям потенциально подходит для решения современных научных задач экспериментальной ядерной физики, ядерной астрофизики (звездный нуклеосинтез) [9] и бионанотехнологий, обозначенных в ПТП ОИЯИ.

По состоянию на 2020–2021 годы в РФ и странах-участницах ОИЯИ количество специализированных ядерных микропучковых спектрометров (ядерных микрозондов) крайне ограничено: всего 1–2 действующие установки: В источниках упоминается один работающий микропучковый спектрометр в Сарове [10] и миропучковый спектрометр на источнике синхротронного излучения в ЦКП «СЦСТИ» (ИЯФ СО РАН, Новосибирск) и УНУ «КИСИ-Курчатов» (НИЦ «Курчатовский институт», Москва). В целом всего 2 единицы подобных приборов в РФ и странах-участницах ОИЯИ.

Синхролнонные микрозонды. Мировая сеть микропучковых конфокальных ускорительных установок не является массовой: она сосредоточена в нескольких десятках синхротронных центров, внутри которых работают специализированные beamlines. Наиболее развитые ресурсы сегодня сосредоточены в Европе, США, Японии, Бразилии и России, а ключевыми направлениями остаются micro-XRF, micro-XAS, рентгеновская микроскопия и нанотомография.

Техническая специфика таких станций связана с необходимостью высокой яркости пучка. Это достигается при высоких токах накопительного кольца, обычно от **100 мА** и выше; в ряде современных установок токи достигают сотен мА. При этом ток относится к ускорителю, а не к beamline, тогда как размер фокуса и конфокальность определяются оптической схемой станции.

В Европе безусловным лидером остаётся **ESRF-EBS** во Франции — один из самых интенсивных рентгеновских источников в мире.

В США ведущим центром является **NSLS-II** (Brookhaven), где подтверждены параметры **3 GeV** и **500 mA**, а также **29 operational beamlines**. Это одна из самых развитых современных площадок для **micro-XRF**, **XAS** и imaging. Наряду с ним значительную роль играет **APS / APS-U**, ориентированный на жёсткое рентгеновское излучение и микрофокусные исследования.

Бразильский **SIRIUS** относится к классу **high-brightnesssources**. Для него корректно указывать **3 GeV** и высокий максимальный ток, но не жёстко фиксировать промежуточные рабочие значения без уточнения режима эксплуатации.

В России ключевым объектом 2026 года становится **СКИФ**. В материалах по первой очереди подтверждаются станции **«Микрофокус»**, **«Структурная диагностика»**, **«Быстрые процессы»** и **XAFS/магнитный дихроизм**; сообщалось также о высокой степени готовности научного оборудования и о запуске первой очереди в 2026 году.

Вторым опорным российским центром остаётся **КИСИ (Курчатовский институт)** и более широкая курчатовская синхротронная база. Для этих установок характерны пользовательские станции микро-РФА и спектроскопии, пригодные для культурного наследия, нанобиоматериалов и междисциплинарных задач.

Япония остаётся одним из главных мировых центров. **SPring-8** — одна из самых мощных синхротронных установок мира с энергией **8 GeV**; это эталонный hard X-ray источник для микроанализа, рентгеновской микроскопии и материаловедческих исследований. **KEK Photon Factory** в Цукубе продолжает работать как крупный пользовательский источник с развитой программой микроанализа.

Таблица 1. Сводная таблица ключевых центров.

Страна	**Центр**	**Ключевая микропучковая станция**
Россия	СКИФ	«Микрофокус»
Россия	КИСИ (Курчатов)	микро-РФА / спектроскопия
Япония	SPring-8	BL37XU и др.
Япония	KEK Photon Factory	станции микроанализа
Франция	ESRF-EBS	ID16 и др.
США	NSLS-II	SRX
США	APS / APS-U	hard X-raymicroprobe
Бразилия	SIRIUS	Carnaúba

Следует отметить, что проблема устаревания и остановки ускорителей за последние 30 лет в РФ имела системный характер. Только за период с 1990 по 2014 г. количество ускорителей сократилось с 27 до 12 – 15 единиц. В РФ практически прекратились разработки и производство собственных ускорителей (кроме г. Сарова и Новосибирска), тогда как лидирующие позиции по производству и количеству ускорителей закрепились за США.

Возможности некоторых ускорительных научных центров

1. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). The Ion Beam Center (IBC).

Центр ионно-лучевой химии (IBC) предоставляет все стандартные методы ионно-лучевого анализа (IBA) для неразрушающего и количественного химического анализа образцов (от H до U) с дополнительным элемент-специфическим профилированием по глубине до нескольких микрометров. Кроме того, центр предлагает высокоразрешающее резерфордовское рассеяние (HR-RBS), латерально-разрешенный элементный анализ (ионный микрозонд) и измерения insitu, сочетающие в себе несколько методов (Рис.1, Табл.2.) [11].

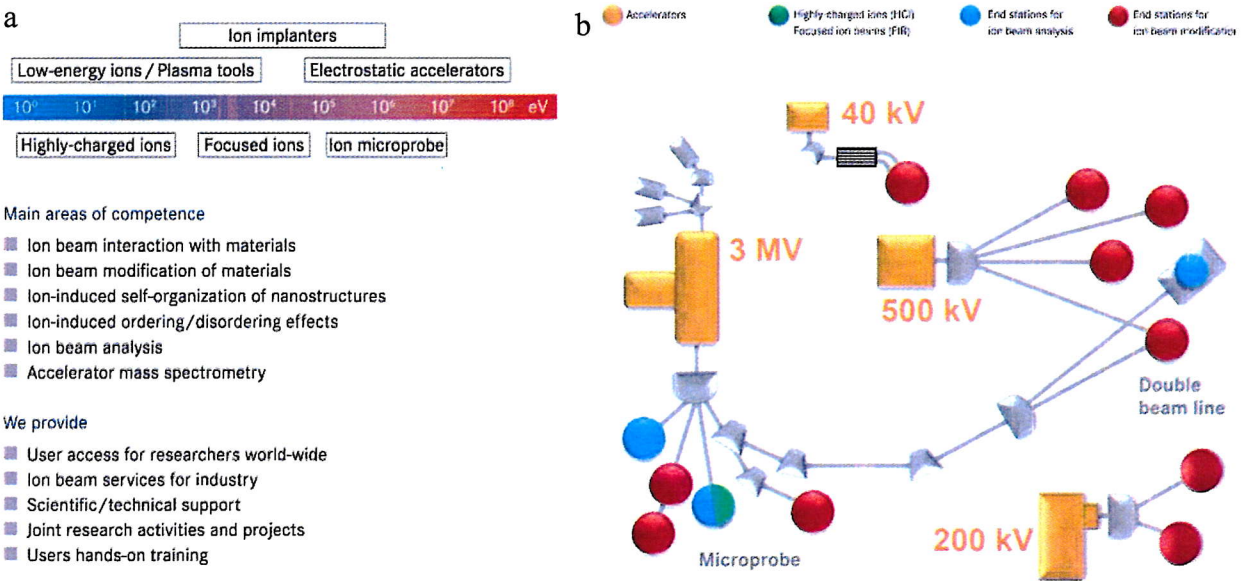

Рисунок 1. Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). The Ion Beam Center (IBC).

Таблица 2. Технические возможности ядерных спектрометров Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). The Ion Beam Center (IBC).

Method	Elements	Detection limit [at%]	Resolution	
			depth	lateral
RBS	O – U	0.1	10 nm	0.5 mm
HR-RBS	Al – U	1	2 nm	1 mm
ERD	H, B – Si	0.1	15 nm	1.5 mm
PIXE	Si – U	0.001		
PIGE	Li – P	0.01		
o Standard			-	1 mm
o μ-Probe			-	3 μm
NRA	H, B, C, N, F, O, ...	0.02	5 nm	0.5 mm

Ускорительный комплекс позволяет проводить следующие исследования:

- Количественные профили распределения элементов по глубине в слоистых материалах
- Определение водорода и профилирование по глубине

- Боковое картирование элементов (визуализация) геологических образцов
- Перекрестная калибровка плотности потока ионной имплантации
- Исследование повреждений кристаллов с использованием ионного каналирования.

Ионный микрозонд

- Боковое распределение элементов или профили глубины с боковым разрешением в несколько микрометров с использованием PIXE, RBS, RBS/C, ERD и/или NRA
- Количественный метод без использования стандартов с точностью < 5%

Параметры:

- Анализируемые элементы: зависят от применяемой методики
- Боковое разрешение:
  - 1 x 1 мкм²
  - 10 x 10 мкм² (channeling)
- Площадь сканирования: < несколько мм²
- Пределы обнаружения:
  - 0,2 атом-% (H и B-F)
  - 0,001 атом-% (для Al-U)
- Глубина анализа (макс.): 1 мкм
- Разрешение по глубине: ~ 20 нм [12].

2. Universität Leipzig ION Nano Probe LIPSION
Высокоэнергетический ионный нанозонд LIPSION, Лейпциг.

Ускорительный комплекс представлен на Рис.2 [13].



Рисунок 2. Высокоэнергетический ионный нанозонд LIPSION, в книверситете Universität Leipzig ION Nano Probe LIPSION.

Ускоритель: однокаскадный ускоритель 3.5 MV Singletron (High Voltage Engineering Europa).

Типы частиц: Установка работает с пучками протонов и ионов гелия. Используются протоны с энергией 2.25 МэВ.

Пространственное разрешение:

- При высокоточном режиме: до 0.3 мкм.
- При рутинном анализе: около 0.5 мкм.
- При скоростном картировании: 1–2 мкм (для высокой пропускной способности) [14].

Применяемые методы анализа

- PIXE (Particle Induced X-ray Emission): Количественный анализ микроэлементов с чувствительностью на уровне ppm (частей на миллион).
- RBS (Rutherford Backscattering Spectrometry): Определение профилей концентрации элементов и толщины пленок.
- STIM (Scanning Transmission Ion Microscopy): Изучение распределения плотности образца (структурная микроскопия).
- Томография: Возможность проведения 3D-исследований с помощью PIXE- и STIM-томографии.

Установка оптимизирована для работы с биологическими тканями, включая возможность адресного облучения живых клеток [15].

3. NewAGLAE (Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Elémentaire)

Единственный в мире ускоритель частиц, полностью предназначенный для изучения объектов культурного наследия, расположенный в подвалах Лувра (Рис. 3.). Новая версия микрозонда позволяет проводить неинвазивный химический анализ произведений искусства прямо на воздухе (без вакуума) с беспрецедентной точностью [16, 17].

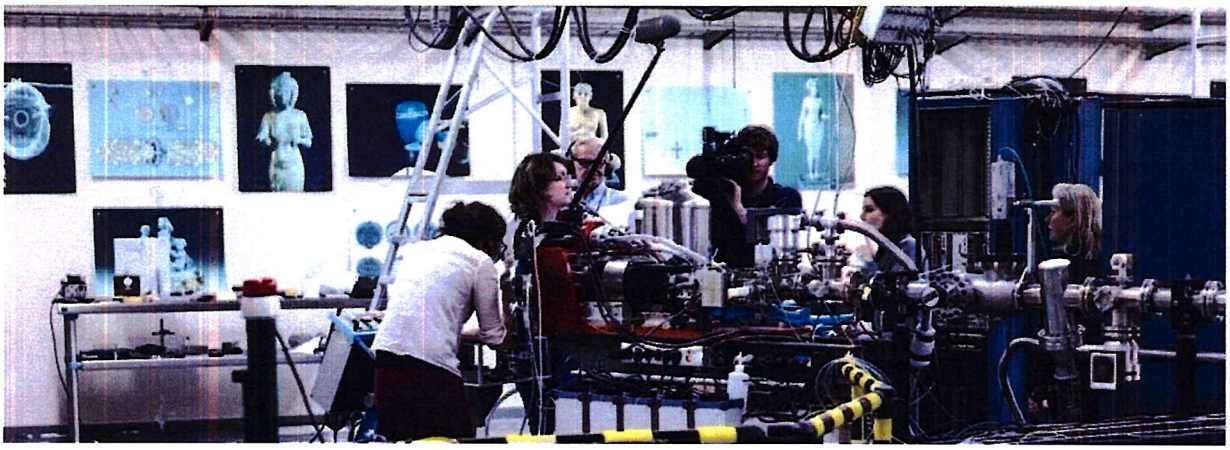

Рисунок 3. Ускорительный комплекс AGLAE в работе.

Установка построена на базе тандемного ускорителя Pelletron 2MV и уникальна своей системой вывода микропучка в атмосферу (External Microbeam), что позволяет анализировать экспонаты любого размера — от ювелирных изделий до картин и статуй — без изъятия проб и без помещения их в вакуум. Модернизированная версия New AGLAE обеспечивает пространственное разрешение до 20–50 мкм и позволяет одновременно проводить многоэлементное картирование методами PIXE, PIGE, RBS и IBIL.

4. Surrey IonBeam Centre

SurreyIon Beam Centre (SIBC) является ведущей национальной исследовательской площадкой Великобритании в области ионно-лучевых технологий, поддерживаемой Исследовательским советом по инженерным и физическим наукам (EPSRC). Установка выделяется среди европейских аналогов своей узкой специализацией на прецизионной модификации материалов для квантовых технологий и высокоточном анализе биологических систем.

Центр оперирует несколькими ускорителями, включая тандемный ускоритель на 2 МэВ и установку высокого тока (Danfysik), однако ключевым инструментом для междисциплинарных исследований выступает их комплекс микропучковых линий. SIBC уникален тем, что сочетает классический микро-анализ состава с возможностью «поштучной» имплантации ионов в наноразмерные структуры, что делает его критически важным узлом для разработки полупроводников нового поколения (Рис.4).

В центре функционируют две основные микропучковые линии, каждая из которых оптимизирована под конкретный класс задач:

1. **Горизонтальный микрозонд (Horizontal Microprobe):**
   Разрешение: субмикронное (до **0.5–1.0 мкм**).
   Методы: PIXE, RBS, EBS (упругое обратное рассеяние), NRA.
2. **Вертикальный микропучок (Vertical Microbeam):**

Это одна из немногих в мире установок, позволяющая облучать живые клетки и организмы (например, *C. elegans*) в их естественной влажной среде. Пучок направлен вертикально вверх, что позволяет исследовать образцы в чашках Петри без потери жизнеспособности.

Режим Single-IonHit: Система способна доставлять строго заданное количество ионов (вплоть до одного) в конкретную органеллу клетки с точностью до микрона.

3. **Наноимплантатор:**

Специализированная установка для «встреливания» одиночных ионов (например, фосфора или висмута) в кремниевые подложки с целью создания кубитов для квантовых компьютеров [18].

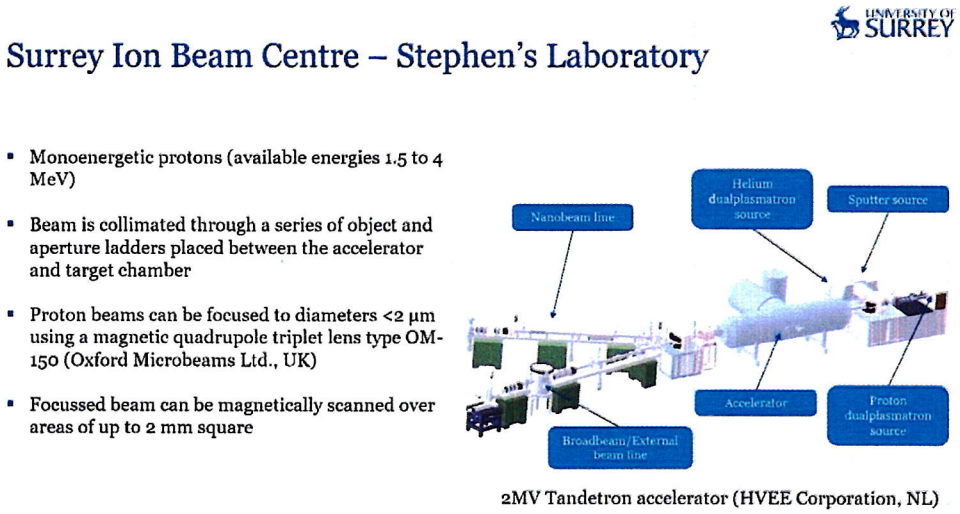

Рисунок 4. Ускорительная инфраструктура центра **Surrey IonBeam Centre.**

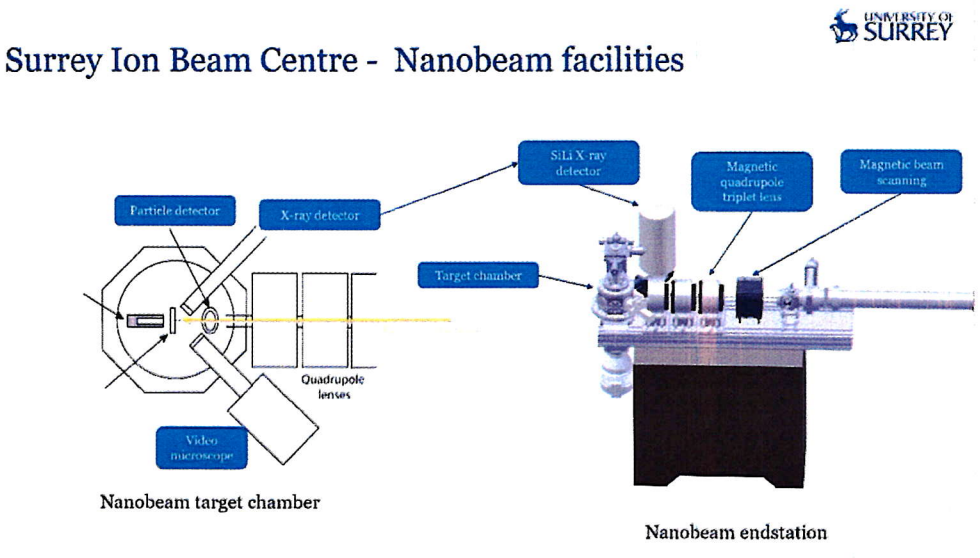

Рисунок 5. Схема ядерного микрозонда в центре Surrey IonBeam Centre.

5. JSI, Jožef Stefan Institute

В Институте Йожефа Стефана (JSI, JožefStefan Institute) в Любляне находится один из самых активных и высокотехнологичных микропучковых центров в Европе [19].

Микроаналитический центр JSI оперирует одной из наиболее востребованных в Европе установок для биомедицинских исследований. Согласно актуальным данным, около 80% рабочего времени микропучка JSI выделяется под задачи биологии и медицины, что обусловило специализацию центра на работе в высокотоковом режиме для картирования следовых элементов (например, кадмия) на субклеточном уровне.

Установка построена на базе тандемного ускорителя и оптимизирована для достижения стабильного пучка при длительных измерениях (до 18–24 часов).

Ускоритель: 2 MV Tandetron (High Voltage Engineering Europa).

Энергия пучка: стандартно используется пучок протонов с энергией 3 МэВ.

Рабочий ток (High-currentmode): В режиме микро-PIXE поддерживается ток в диапазоне **100–300 пА**.

Пространственное разрешение: В режиме высокого тока достигнуты размеры пятна 600–700 нм (0.6–0.7 мкм), что позволяет проводить элементный анализ внутри отдельных органелл клетки.

Применяемые методы:

Micro-PIXE: Основной метод количественного анализа с абсолютной калибровкой.

STIM (ScanningTransmissionIonMicroscopy): используется для визуализации морфологии мягких тканей и нормализации данных по плотности.

6. Национальная лаборатория Леньяро (INFN-LNL, Италия)

Микроаналитический комплекс INFN-LNL базируется на ускорителе Ван де ГраафаAN2000 (2 МэВ) и является ключевым итальянским центром ядерного микроанализа. Особенностью лаборатории в Леньяро является фокус на методе IBIC (IonBeamInducedCharge), который позволяет исследовать транспорт заряда и радиационную стойкость полупроводниковых устройств в микромасштабе.

Основные характеристики:

Ускоритель: 2 MVVandeGraaff (AN2000).

Типы частиц: Протоны и ионы гелия с энергией до 2.2 МэВ.

Пространственное разрешение:1.5–2.0 мкм.

Ключевые методы:

IBIC (IonBeamInducedCharge): Уникальный метод картирования электронных свойств полупроводников. Пучок сканирует работающую микросхему, выявляя локальные дефекты и зоны потери заряда.

Micro-PIXE / Micro-RBS: Стандартный элементный анализ.

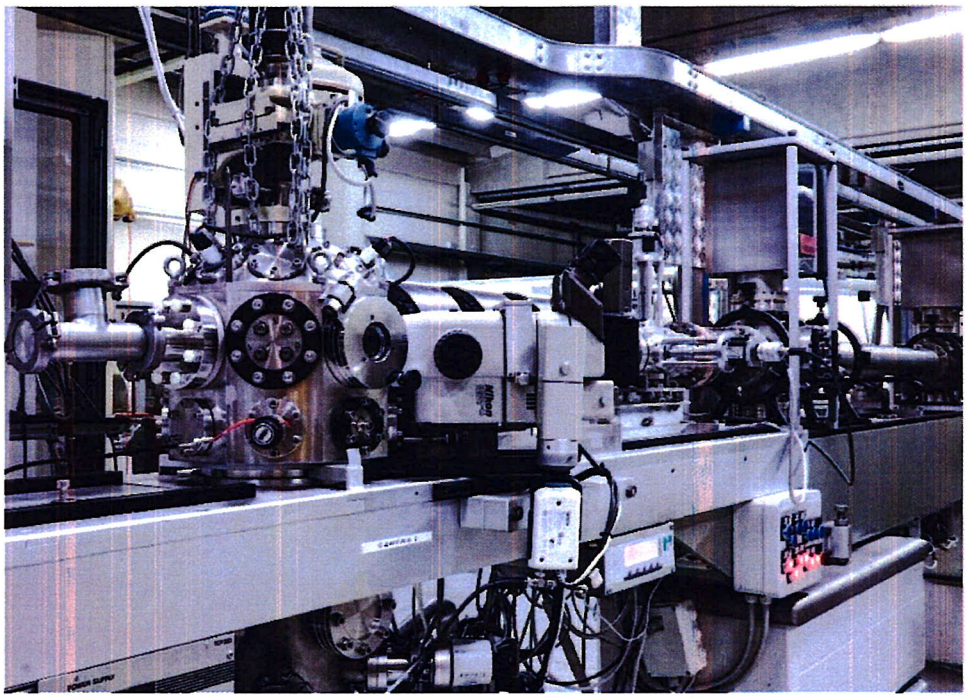

Рисунок 6. Внешний вид ядерного микрозонда в лаборатории Леньяро (INFN-LNL, Италия).

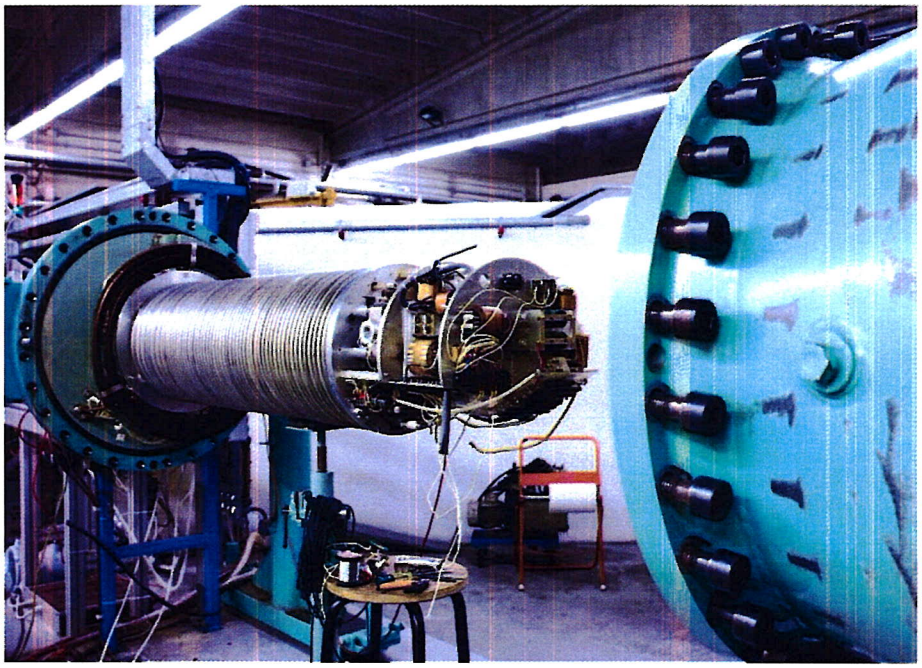

Рисунок 7. Внешний вид высоковольтной структуры и высоковольтного терминала ускорителя в лаборатории Леньяро (INFN-LNL, Италия).

7. Лаборатория ионно-лучевого анализа (LIBA) — Университет Лунда (Швеция)

Lund Nuclear Microprobe широко применяется в биологии, медицине и материаловедении.

Ускоритель: 3 MV Pelletron (модель 3UDH, тандемный ускоритель производства NEC).
Типы частиц: Протоны, дейтроны и тяжелые ионы (углерод, литий и др.).
Пространственное разрешение: Стандартное — около 1–2 мкм, однако специализированная субмикронная линия (sub-micronsetup) позволяет достигать разрешения ниже 1 мкм. [20].

Исторически Лунд является местом создания метода PIXE, что определило специализацию центра на прецизионном количественном анализе. Ключевой особенностью лаборатории является глубокая интеграция метода ядерных реакций (Micro-NRA) в микропучковую линию, что позволяет картировать не только тяжелые металлы, но и сверхлегкие элементы (водород, азот, литий), недоступные для стандартного рентгеновского анализа.

Ключевые методы:

- **Micro-PIXE:** Основной метод для количественного картирования микроэлементов с высокой чувствительностью.
- **STIM (ScanningTransmissionIonMicroscopy):** используется для определения локальной плотности и топографии образцов, часто одновременно с PIXE.
- **NRA (NuclearReaction Analysis):** позволяет анализировать легкие элементы, такие как литий, бор и фтор.
- **CANS (Compact Accelerator-drivenNeutron Source):** Новое направление лаборатории - использование ускорителя для генерации нейтронных пучков для активационного анализа и тестирования детекторов [21].

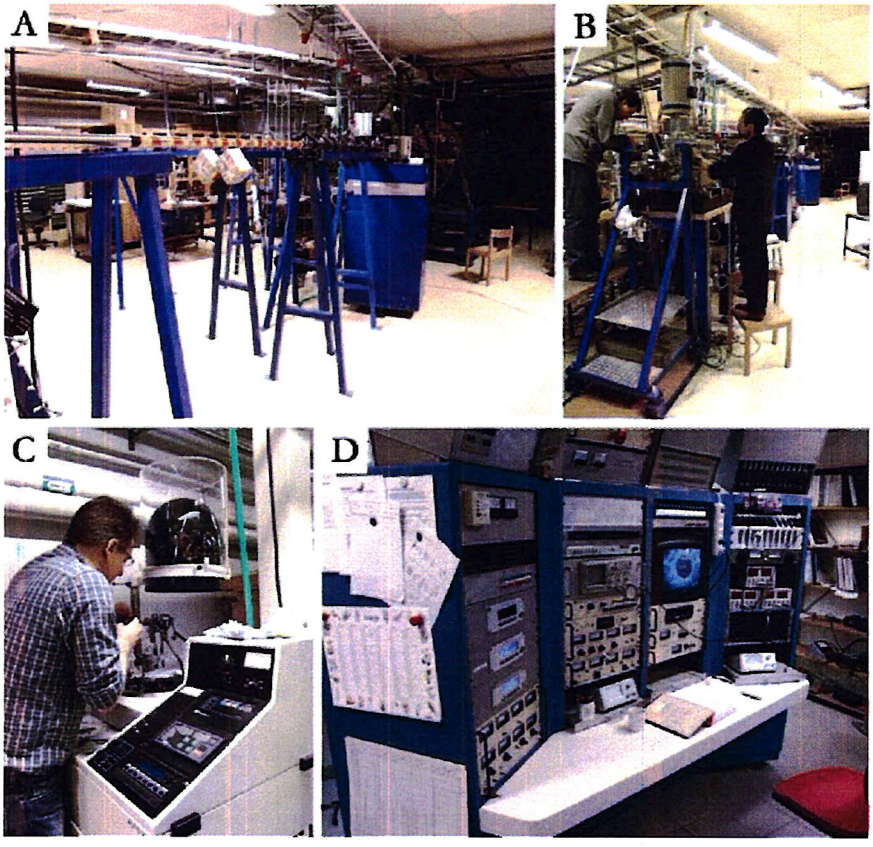

Рисунок 8. Установка ядерного микрозондирования Лундского университета: A) Ускоритель и линия пучка; B) Доктор Ян Паллон помещает один из образцов в экспериментальную камеру; C) Доктор Микаэль Эльфман готовит образец для нанесения углеродного покрытия; D) Центр управления NMP.

8. Лаборатория физики ионных пучков (LIP) — ETH Zurich (Швейцария)

Специализация лаборатории LIP ETH Zurich сосредоточена на прецизионном анализе элементного состава и структуры тонкопленочных материалов для микро- и наноэлектроники. Ключевой компетенцией центра является применение тяжелых ионов высоких энергий для метода HI-ERDA, что позволяет решать критическую для материаловедения задачу — количественное определение профилей концентрации легких элементов (включая водород и литий) в присутствии тяжелой матрицы. Благодаря использованию уникальных магнитных спектрометров для HR-RBS, лаборатория обеспечивает беспрецедентное разрешение по глубине (на нанометровом уровне), что делает её ведущим центром для исследования диффузионных процессов, интерфейсов в гетероструктурах и функциональных слоев перспективных полупроводниковых устройств.

Технические параметры:

Ускорительный комплекс: 6 MV EN Tandem (основной для тяжелых ионов) и 2 MV Tandetron.

Типы анализирующих пучков: Протоны, ионы гелия, тяжелые ионы (I, Au, Cu, Cl) для реализации HI-ERDA.

Пространственное разрешение микропучка: 2–5 мкм (оптимизировано под задачи материаловедения).

Метод HI-ERDA: Применение времяпролетных (ToF) и газонаполненных ионизационных детекторов для одновременного анализа всех легких и тяжелых элементов.

Метод HR-RBS: Использование магнитного спектрометра высокого разрешения для профилирования слоев с точностью до нескольких нанометров [22].

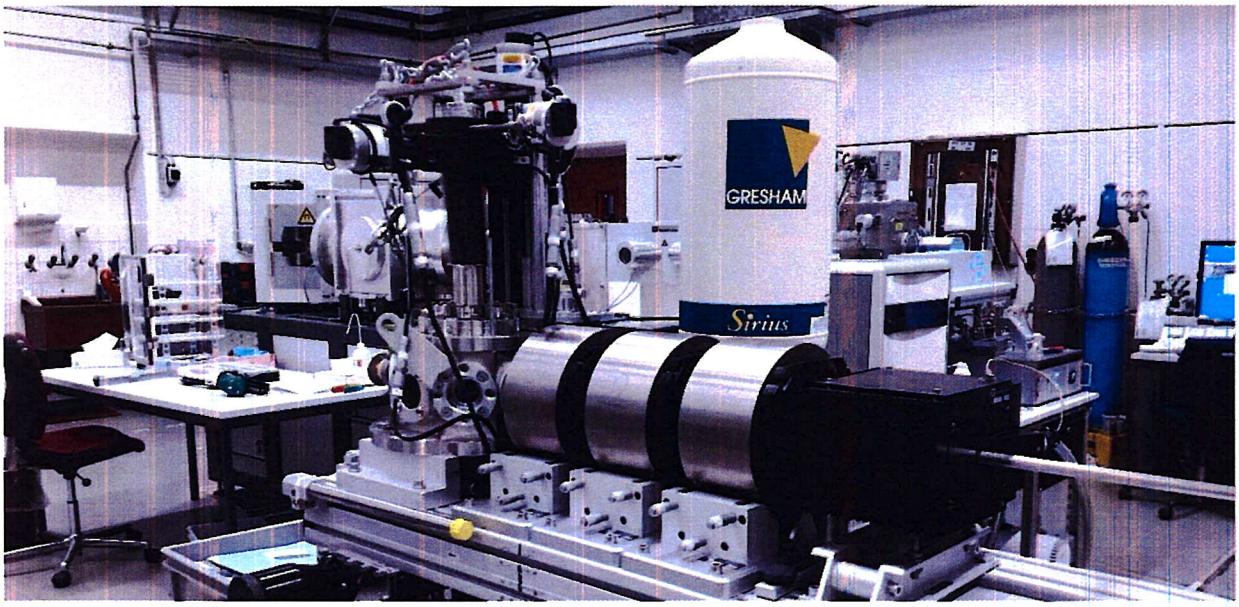

Рисунок 9. Лаборатория физики ионных пучков (LIP) — ETH Zurich (Швейцария).

9. Лаборатория ионно-лучевых взаимодействий (LIBI) — Институт Руджера Бошковича (Загреб, Хорватия)

Институт Руджера Бошковича занимает уникальную нишу: здесь не только проводят элементный анализ, но и занимаются прецизионным облучением одиночными ионами (Single IonHit)

Технические параметры:

Ускорители: 1.0 MVTandetron (4110-Bo) и 6.0 MVTandemVandeGraaff (ENTandem).

Микропучковые линии: 5 рабочих линий, включая специализированную линию для внешнего пучка и SIH.

Разрешение: 1.0–2.0 мкм (стабильно), для протонов возможны субмикронные значения.

Режимы работы:

Высокотоковый (1–1000 пА): для методов PIXE, RBS и NRA.

Низкотоковый(< 1фА): для методов STIM и IBIC.

Уникальные методы: Single IonHit (SIH), MeV-SIMS (масс-спектрометрия вторичных ионов на мегавольтных энергиях).

Пространственное разрешение: составляет 1.0–2.0 мкм.

Методы анализа: PIXE / RBS / NRA / ERDA

IBIC (Ion BeamInduced Charge): Один из ключевых методов в Загребе (аналогично Леньяро) для анализа электронных свойств полупроводников и алмазных детекторов.

IBIL (Ion Beam Induced Luminescence): Анализ свечения материалов под пучком, что эффективно для идентификации минералов и дефектов в диэлектриках.

Single IonHit (SIH) - установка, позволяющая направить ровно один ион в конкретную точку образца (например, в ядро живой клетки или кубит квантового процессора) с обратной связью в реальном времени [23, 24].

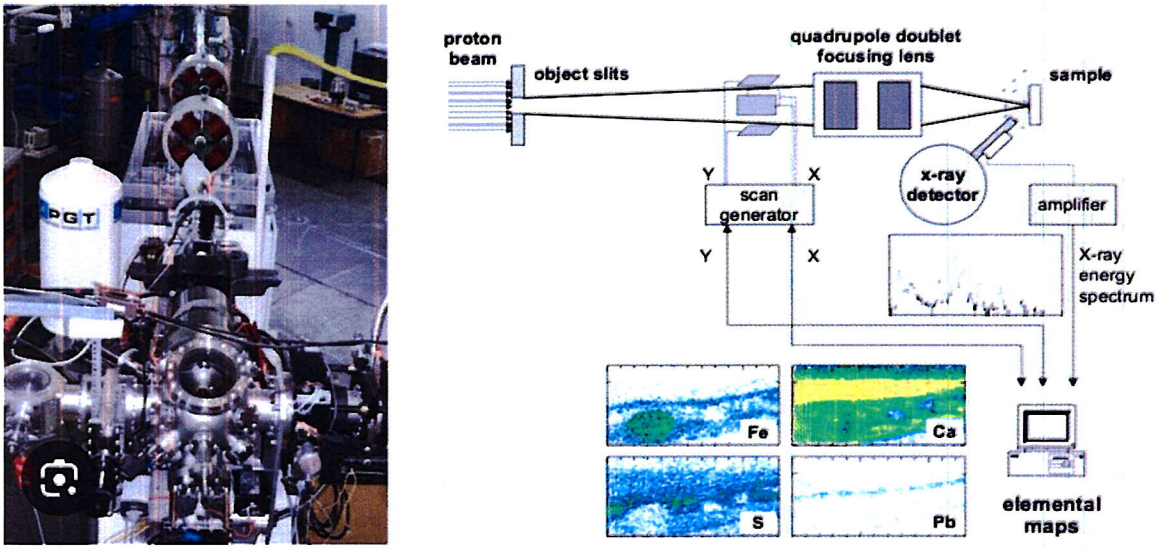

Рисунок 10. Внешний вид ядерного микрозонда и схематическое изображение канала микропучкового сканирования в Лаборатории ионно-лучевых взаимодействий (LIBI).

10. Центр ионно-лучевого анализа, CIBA NUS (Сингапур)

Центр CIBA при Национальном университете Сингапура является абсолютным мировым лидером в области субмикронной фокусировки ионных пучков высоких энергий. В то время как лучшие европейские лаборатории достигают разрешения в 300 нм, CIBA удерживает мировой рекорд на отметке ниже 20 нм.

Ускоритель: 3.5 MV Singletron (производства High Voltage Engineering Europa).
Пространственное разрешение: Мировой рекорд — **ниже 20 нм** для протонов высоких энергий. В стандартном режиме работы разрешение составляет **30–50 нм.**

Основные методы:
- **P-BeamWriting (Протонная литография):** Уникальный метод создания трехмерных наноструктур в полимерах и полупроводниках с очень высоким аспектным отношением.
- **HR-STIM:** Сканирующая трансмиссионная ионная микроскопия высокого разрешения для визуализации внутренней структуры клеток.
- **Micro-PIXE/RBS:** Элементный анализ на наноуровне.

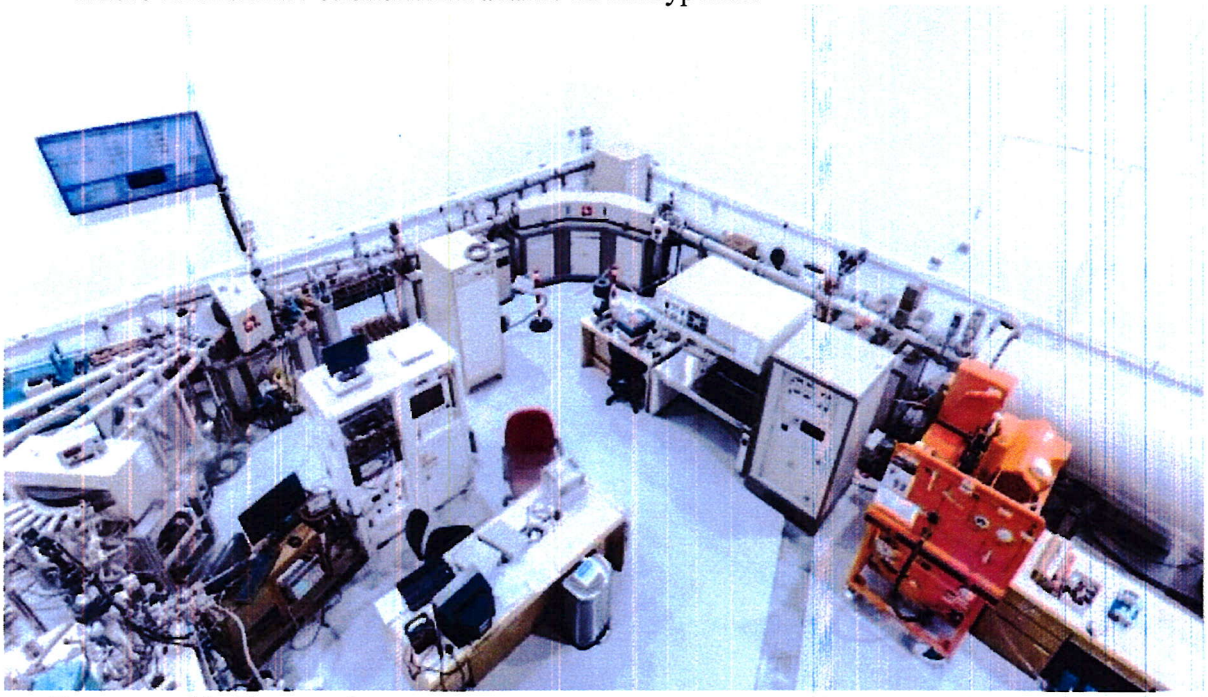

Рисунок 11. Ядерно-физичсекая установка Центра ионно-лучевого анализа CIBA.

Области применения: **Нанолитография и микрофлюидика,** создание пресс-форм для тиражирования микрофлюидных чипов и оптических решеток с вертикальными стенками атомной гладкости.

Биомедицина (Нано-визуализация клеток) Изучение распределения наночастиц и лекарственных соединений внутри отдельных органелл клетки. Благодаря разрешению в 30 нм, CIBA позволяет видеть не просто «клетку», а конкретные структуры внутри неё [25].

11. Комплекс TIARA (QST) г. Такасаки (Япония)

Ускорительный комплекс: включает четыре различных ускорителя:

1. Азимутально-вариационный циклотрон (AVF cyclotron) — для высокоэнергетичных пучков.

2. 3 MV тандемный ускоритель (Pelletron).

3. 3 MV ускоритель одиночного типа (Singletron).

4. 0.4 MV ионный имплантер.

Пространственное разрешение микропучка: около 1 мкм для тяжелых ионов высоких энергий.

12. Центр CYRIC (Университет Тохоку) — г. Сендай (Япония)

Ускорительный комплекс: основной AVF-циклотрон (930-циклотрон) и малый циклотрон (HM12) для производства ПЭТ-радиоизотопов.

Микропучковые линии: В центре функционируют две независимые линии: MB-I (для одновременного анализа PIXE, RBS и STIM в вакууме или на воздухе) и новая MB-II (оптимизирована для высокого тока пучка при микронном разрешении).

Энергия: Протоны с энергией до **3–4.5 МэВ** (на базе ускорителя Dynamitron) и значительно более высокие энергии на основном циклотроне.

Пространственное разрешение: стабильно достигается 0.6 × 0.8 мкм при токе 150 пА. В стандартных режимах для биологических исследований разрешение составляет около 1 мкм [26].

13. Корейский институт базовых наук (KBSI) — г. Бусан (Южная Корея)

Центр располагает несколькими установками, включая компактный линейный ускоритель и тандемные системы. Ключевой особенностью является использование высокочастотных источников ионов ECR (Electron CyclotronResonance) мощностью 14 ГГц и 28 ГГц для генерации интенсивных пучков многозарядных тяжелых ионов.

Энергия: Линейный ускоритель RFQ (Radio-Frequency Quadrupole) разгоняет ионы (например, лития) до энергий порядка 2 МэВ/нуклон.

Пространственное разрешение: Микропучковые линии центра обеспечивают разрешение на уровне 1.0–2.0 мкм, что типично для современных исследовательских комплексов общего назначения.

Уникальное оборудование: В Бусане установлен первый в Корее вторично-ионный масс-спектрометр сверхвысокого разрешения SHRIMP-IIe/MC.

High-Current IonIrradiation: Исследование радиационного старения материалов под воздействием мощных ионных пучков.

Fast Neutron Generation: Получение нейтронных потоков для радиографии и тестирования материалов ядерной энергетики.

SHRIMP (Sensitive High ResolutionIonMicroProbe): Изотопный анализ минералов и наноматериалов с экстремальной точностью.

14. Австралийский национальный университет (ANU)

14UD Pelletron (вертикальный тандемный ускоритель высотой с 15-этажный дом). Он работает при терминальном напряжении до **15.5 MB**.

Дополнительное оборудование: Линейный ускоритель со сверхпроводящими резонаторами (Energy Booster), который еще больше разгоняет частицы.

Типы ионов: почти все элементы таблицы Менделеева — от водорода до урана.

Пространственное разрешение:Микропучковая линия (Heavy Ion Microprobe) обеспечивает фокусировку тяжелых ионов до **1–2 мкм**.

Ключевые методы:

AMS (Accelerator Mass Spectrometry): ANU считается одной из лучших в мире площадок для сверхчувствительного изотопного анализа (особенно хлора-36 и йода-129).

Heavy Ion ERDA: Профилирование состава тонких пленок с использованием тяжелых ионов.

IonBeamModification (IBMM): Создание дефектов и изменение свойств материалов на большой глубине [27].



Рисунок 12. Внешний вид ускорителя 14UD Pelletron (Австралийский национальный университет).

15. Los Alamos National Laboratory (LANL) — Лос-Аламос, Нью-Мексико

IonBeamMaterials Laboratory (IBML): ключевая площадка LANL для работы с ионными пучками. Лаборатория оснащена ускорителем Pelletron (3.2 MB), который позволяет проводить:

- **PIXE (Particle-Induced X-rayEmission):** Анализ элементного состава с высокой чувствительностью.
- **RBS (RutherfordBackscatteringSpectrometry):** Определение профиля распределения элементов по глубине.
- **NRA (NuclearReaction Analysis):** Обнаружение легких элементов (например, водорода или лития), что критично для ядерной энергетики.
- **Superconducting Nuclear Microprobe**: исторически в Лос-Аламосе была разработана уникальная линия ядерного микрозонда с использованием сверхпроводящих линз, позволяющая фокусировать протонные пучки до экстремально малых размеров (пятно около 1 мкм) для зондирования микроструктур [28].

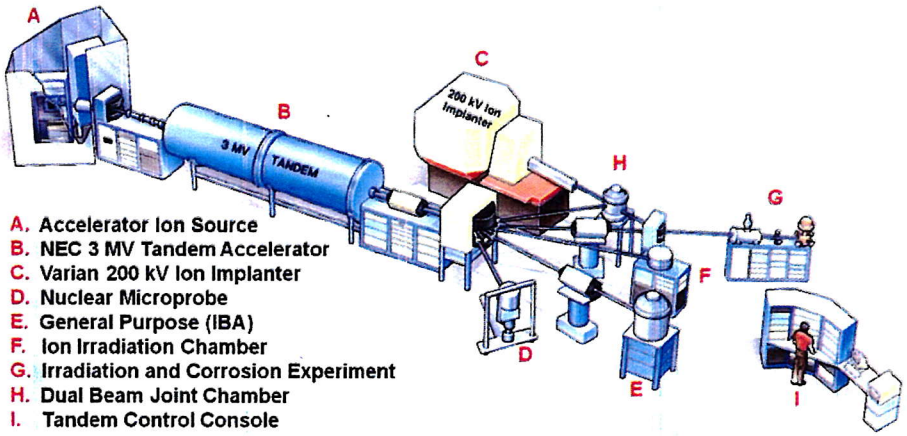

Рисунок 13. Ускорительный комплекс в Los Alamos National Laboratory (LANL) — Лос-Аламос, Нью-Мексико.

Ускорительная инфраструктура в России

16. НИИЯФ МГУ (Россия)

Ускоритель Ван де Граафа HVEE-AN2500

Генератор Ван-де-Граафа – электростатический генератор AN-2500 – ускоряет положительные ионы водорода (протоны) и гелия (альфа-частицы) до энергии около 1 МэВ/заряд. Ускоритель используется в НИИЯФ МГУ в работах по исследованию структуры различных материалов методами обратного рассеяния, спектрометрии ядер отдачи и других; а также для исследования воздействия пучков заряженных частиц микронных размеров на компоненты клеточных структур (ядра раковых клеток). Произведен в Голландии [29].

Ускоритель Ван де Граафа ЭГ-8

Генератор Ван-де-Граафа – электростатический генератор положительных ионов ЭГ-8 – ускоряет ядра водорода (протоны) и ядра гелия (альфа-частицы) до энергии около 2,5 МэВ/заряд. Используется в НИИЯФ МГУ в работах по исследованию структуры поверхностных слоев различных материалов, в том числе передней стенки термоядерного реактора; по исследованию воздействия мелких частиц на космические аппараты путем ускорения твердых частиц размерами 0,1-3 мкм до скоростей 10-20 км/с, имитирующих метеорные частицы и космический мусор. Произведен в России (НИИЭФА) [30].

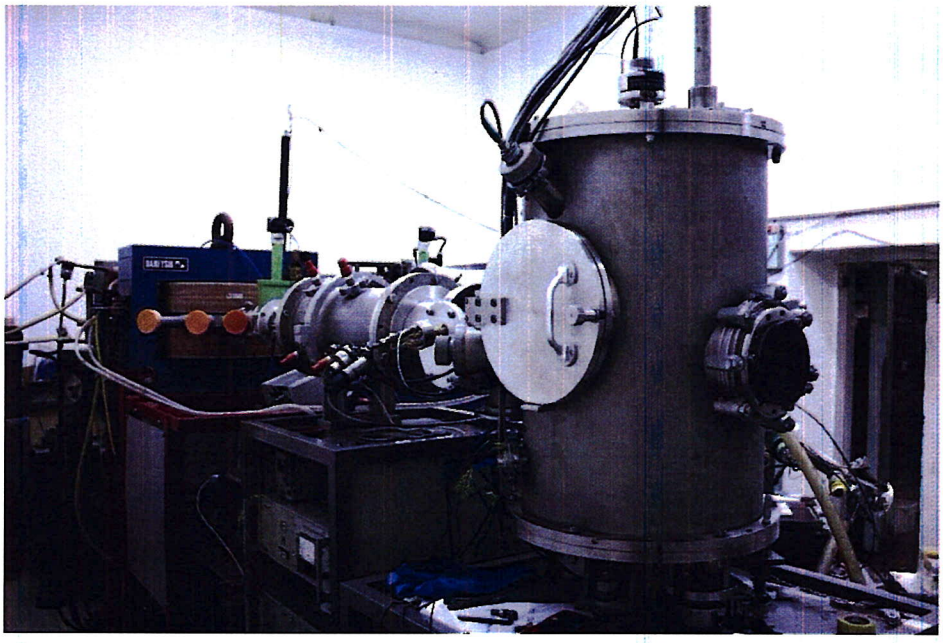

Рисунок. 14. Ускоритель Ван де Граафа HVEE-AN2500.

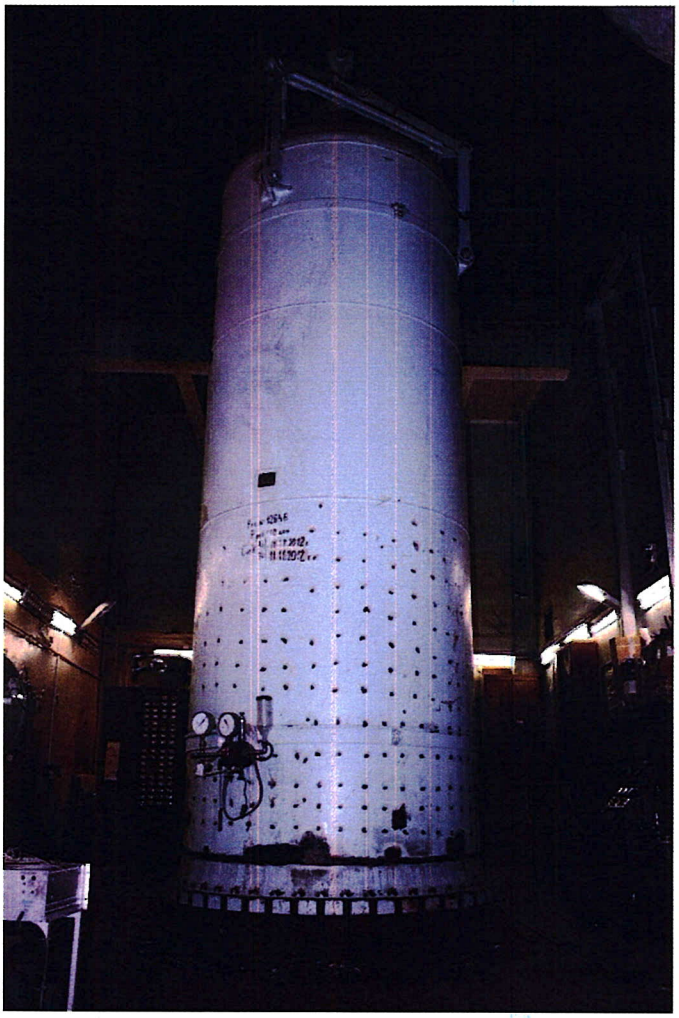

Рисунок 15. Ускоритель Ван де Граафа ЭГ-8.

Заключение

По состоянию на 2019 г. в РФ и странах ОИЯИ действовало **не более 5–6** ЭСУ ускорителей, пригодных для быстрых нейтронов [31], что ограничивает исследования.

По состоянию на 2026 г. мировая инфраструктура насчитывает **60–70** одноступенчатых ЭСУ, пригодных для микрозондов (Европа ~35%, Азия ~25%, США/Австралия ~25%, РФ/ОИЯИ ~5–8%). В Российской Федерации и государствах-участниках Объединённого института ядерных исследований наблюдается критический дефицит таких установок, что существенно ограничивает исследования в области радиационной биологии, наноэлектроники, бионанотехнологий и материаловедения.

По состоянию на 2019 г. в РФ функционировало **не более 4–5** ЭСУ ускорителей, пригодных для производства быстрых нейтронов через реакции (d,n) и (p,n). Основные установки:

Таблица 2. Действующие ЭСУ в РФ.

Центр	**Ускоритель**
НИИЯФ МГУ	HVEE AN-2500
НИИЯФ МГУ	ЭГ-8
ОИЯИ	ЭГ-5
ИФМ СО РАН	Тандетрон 3 МВ

В остальных странах-участницах ОИЯИ информации об активных ЭСУ нет в открытом доступе.

По открытым источникам и историческим данным, в РФ имелось **6–8** ЭСУ Ван-де-Граафа, выведенных из эксплуатации к 2026 г. из-за износа, отсутствия финансирования или демонтажа. Основные:

Таблица 3. Неработающие/демонтированные ЭСУ в РФ [32].

Центр	**Статус вывода**
НИИ ЯФ ТПУ (Томск)	2000-е
ГНЦ РФ — ФЭИ (Обнинск)	~2015
ИЯФ СО РАН (Новосибирск)	1990-е–2000-е
НИЦ «Курчатовский институт» (Москва)	~2010
МФТИ (Долгопрудный)	2010-е

Таким образом, актуально создание ускорительных установок для проведения уникальных исследований и технологических операций с использованием ионных пучков, а так же, получения нейтронов в диапазоне 20 кэВ - 20 МэВ. В частности, такие установки требуются для выполнения приведенных ниже пунктов ПТП в рамках темы 03-4-1146-2024 (Нейтронная ядерная физика).

Список литературы

1 European Synchrotron Radiation Facility. EBS – Extremely Brilliant Source [Электронный ресурс]. URL: https://www.esrf.fr/home/Accelerators/ebs---extremely-brilliant-source.html (дата обращения: 14.05.2026).

2 CERN. ESRF-EBS 352.37 MHz Radio Frequency System [Электронный ресурс]. URL: https://accelconf.web.cern.ch/ipac2021/papers/mopab108.pdf (дата обращения: 14.05.2026).

3 Brookhaven National Laboratory. National Synchrotron Light Source II (NSLS-II) [Электронный ресурс]. URL: https://www.bnl.gov/nsls2/ (дата обращения: 14.05.2026).

4 Sirius (synchrotron light source) [Электронный ресурс] // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Sirius_(синхротрон) (дата обращения: 14.05.2026).

5 International Atomic Energy Agency. Accelerator Knowledge Portal [Электронный ресурс]. URL: https://nucleus.iaea.org/sites/accelerators/SitePages/Home.aspx (дата обращения: 14.05.2026).

6 Watt F., Breese M. B. H., Bettiol A., van Kan J. A. Proton beam writing: review // Materials Today. 2007. – Vol. 10, No. 6. – P. 20–29.

7 Vizkelethy G., Phillips S. D., Najafizadeh L., Cressler J. D. Nuclear microbeam studies of silicon–germanium heterojunction bipolar transistors (HBTs) // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2010. – Vol. 268. – P. 2092–2098.

8 Hable V., Greubel C., Bergmaier A. et al. The live cell irradiation and observation setup at SNAKE // Nucl. Instr. and Meth. B. – 2009. – Vol. 267. – P. 2090–2097.

9 Yuri Gledenov, M. V. Sedysheva, G. Khuukhenkhuu, Huaiyong Bai. Measurement of the cross sections of the Mg 25 (n , α) Ne 22 reaction in the 4–6 MeV region // Physical Review C. – 2018. – Vol. 98(3). – Art. 034605.

10 Nuclear Microprobe Facilities [Электронный ресурс] // Сайт ICNMTA 2008: 11th International Conference on Nuclear Microprobe Technology and Applications. URL: http://w3.atomki.hu/atomki/IonBeam/icnmta/microprobefac.html (дата обращения: 14.05.2026).

11 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). Ion Beam Center (IBC) [Электронный ресурс].URL: https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=55676 (дата обращения: 14.05.2026).

12 Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR). High-current ion implanter [Электронный ресурс]. URL: https://www.hzdr.de/db/Cms?pOid=29856&pNid=1171 (дата обращения: 14.05.2026).

13 University of Leipzig. Felix Bloch Institute: Equipment for Ion Beam Analysis and Modification [Электронный ресурс]. URL: https://www.physes.uni-leipzig.de/en/fbi/aqs/research/equipment (дата обращения: 14.05.2026).

14 Menzel F., Spemann D., Lenzner J., Vogt J., Butz T. Proton beam writing using the high energy ion nanoprobe LIPSION // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2005. – Vol. 231, Iss. 1–4. – P. 372–377. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168583X05001059 (дата обращения: 14.05.2026).

15 Reinert T., Andrea T., Barapatre N. et al. Biomedical research at LIPSION – Present state and future developments // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2011. – Vol. 269, Iss. 20. – P. 2254–2259. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168583X11002540 (дата обращения: 14.05.2026).

16 Calligaro T., Dran J.-C., Ioannidou E. et al. Development of an external beam nuclear microprobe on the Aglae facility of the Louvre museum // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2000. – Vol. 161–163. – P. 328–333. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X9900899X?via%3Dihub (дата обращения: 14.05.2026).

17 Pichon L., Calligaro T., Gonzalez V., Lemasson Q., Moignard B., Pacheco C. Implementation of ionoluminescence in the AGLAE scanning external microprobe // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B. – 2015. – Vol. 348. – P. 68–72. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X15000233 (дата обращения: 14.05.2026).

18 UK National Ion Beam Centre (UKNIBC). User Day Topics [Электронный ресурс]. URL: https://uknibc.co.uk/UserDay/filtered_posts.php?topic=4 (дата обращения: 14.05.2026).

19 INFN Laboratori Nazionali di Legnaro. AN2000 Accelerator [Электронный ресурс]. URL: https://www.lnl.infn.it/en/an2000-2/ (дата обращения: 14.05.2026).

20 Lund University. Ion-beam analysis: development and application of nuclear reaction analysis [Электронный ресурс]. URL: https://portal.research.lu.se/en/publications/ion-beam-analysis-development-and-application-of-nuclear-reaction/ (дата обращения: 14.05.2026).

21 Frost R. J. W., Elfman M., Fissum K. et al. A compact accelerator driven neutron source at the Applied Nuclear Physics Laboratory, Lund University // EPJ Techniques and Instrumentation. – 2023. – Vol. 10. – Art. 14. https://link.springer.com/article/10.1140/epjti/s40485-023-00101-9 (дата обращения: 14.05.2026).

22 ETH Zurich. Materials Sciences Beamline Instruments [Электронный ресурс]. URL: https://ams.ethz.ch/instrumentation/materials-sciences-/beamline-instruments.html (дата обращения: 14.05.2026).

23 Ruđer Bošković Institute (IRB). Laboratory for Ion Beam Interactions [Электронный ресурс]. URL: https://www.irb.hr/eng/Divisions/Division-of-Experimental-Physics/Laboratory-for-Ion-Beam-Interactions (дата обращения: 14.05.2026).

24 Ruđer Bošković Institute (IRB). Experimental end-stations: Ion microprobe [Электронный ресурс]. URL: https://www.irb.hr/eng/Divisions/Division-of-Experimental-Physics/Laboratory-for-Ion-Beam-Interactions/Articles/Experimental-end-stations/Ion-microprobe (дата обращения: 14.05.2026).

25 National University of Singapore. Centre for Ion Beam Applications (CIBA) [Электронный ресурс]. URL: https://www.physics.nus.edu.sg/ciba/ (дата обращения: 14.05.2026)

26 Tohoku University. Related Research Institutions [Электронный ресурс]. URL: https://www.sci.tohoku.ac.jp/english/research/related-research-institutions.html (дата обращения: 14.05.2026).

27 Australian National University. Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) Capabilities [Электронный ресурс]. URL: https://hiaf.anu.edu.au/capabilities/ (дата обращения: 14.05.2026).

28 Los Alamos National Laboratory. CINT: Ion Beam Materials Laboratory [Электронный ресурс]. URL: https://cint.lanl.gov/facilities/general-ion-beam-mat-lab.shtml (дата обращения: 14.05.2026).

29 НИИЯФ МГУ. Ускоритель HVEE AN2500 [Электронный ресурс]. URL: http://beam.sinp.msu.ru/Ускоритель-hvee-an2500/ (дата обращения: 14.05.2026).

30 НИИЯФ МГУ. Ускоритель ЭГ-8 [Электронный ресурс]. URL: http://beam.sinp.msu.ru/Ускоритель-ЭГ-8/ (дата обращения: 14.05.2026).

31 Doyle B. L., Hamm R. W. Industrial Applications of Ion Accelerators // Reviews of Accelerator Science and Technology. – 2019. – Vol. 10. – P. 93–116.

32 Список ускорителей частиц [Электронный ресурс] // Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Список_ускорителей_частиц (дата обращения: 14.05.2026).

Appendix 10

Обобщенный план – график мероприятий по модернизации ЭСУ ЭГ-5

		2026												2027			
		1 кв	2 кв	3 кв	4 кв	1 кв	2 кв	3 кв	4 кв	1 кв	2 кв	3 кв	4 кв	1 кв	2 кв	3 кв	4 кв
1	Оперативные и планово-профилактические ремонты всех систем	X	X	X	X	X	X										
2	Меры по обеспечению **радиационной безопасности и техники безопасности** (установка перил на ремонтной платформе (1), покраска ионопроводов (2), усиление радиационной защиты между Левым экспериментальным залом и стендовым залом (3), разработка дистанционного привода профилометра пучка (4))	X															
3	Ремонт поворотных дверей в зал ЭМА и Левый экспериментальный залы		X	X	X	X	X										
4	**Ионный источник** (Подготовка ТЗ, согласование параметров, изготовление (ИЯФ им. Будкера) Разработка системы управления СВЧ ИИ / (ИЯФ им. Будкера) Замена ИИ Согласование ионной оптики ЭСУ после замены ИИ	X	X	X	X							X	X	X	X	X	
5	**Ремонт высоковольтной системы** узел стабилизации тока заряда ленты (1), очистка поверхности высоковольтного терминала, изоляторов колонны растворителем и плавиковой к-той (2)						X	X									
6	**Модернизация вакуумной системы** (замена высоковакуумных насосов безмасляными аналогами (1), установка вакуумного ресивера (2), замена вакуумметров современными аналогами (3), очистка от паров масла всей системы) подключение системы форвакуумного накопителя	X	X	X	X									X			
7	**Ускорительная трубка.** Подготовка ТЗ, Согласование конструкции УТ, Расчеты УТ (ИЯФ им. Будкера). Изготовление новой УТ (ИЯФ им. Будкера)	X	X	X	X										X		
8	Расчеты узлов сопряжения, подготовка ТЗ, закупка и установка **твердофазной мишени**,				X	X	X										
9	Ремонт – восстановление блока умножителя напряжения перезарядки заряд-транспортной ленты (1), ремонт резервных автотрансформаторов, подвижного узла натяжителя ленты (2), замена подшипников на валах транспортировочной ленты (3), очистка зарядной ленты (4)					X											
10	Замена кабельных коммуникаций в залах ЭСУ					X	X										
11	Разработка конструкторской документации и изготовление и монтаж системы мониторинга профиля ионного пучка на канале № 3							X									
12	Расчеты и разработка **автоматической системы позиционирования ионного пучка** (Семенов В.Н., Рихвицкий В.С.)	X	X	X	X	X	X										
13	**Получение СЭЗ.** Подготовка документов и проведение мероприятий для получения СЭЗ включая, зонирование помещений (1), проведение всех необходимых замеров (2), проверка ПНИПов, блокировок (3), получение СЭЗ (4) .	X	X	X	X	X	X	X	X								
14	**Модернизация газокомпрессорной станции.** Подготовка ТЗ, проектирование новой технологической схемы (ООО «Промэкспертиза») Замена компрессора, включая согласование технологической схемы, закупку нового компрессора, обучение персонала. Получение проекта, установки компрессора (ООО «Промэкспертиза») и возобновление				X	X	X	X	X			X					

	работы газокомпрессорной станции (ГКС)																	
15	Ремонт зала ЭМА												X					
16	Монтаж СРК и СБиС, Получение проекта СРКиСБиС. **Введение в эксплуатацию СРК и СБиС**									X	X							
17	Модернизация **системы подготовки диэлектрического газа** (Замена низковакуумного насоса откачки котла (1), установка входных газовых фильтров (2), замена системы осушки (3), установка редуцирующих устройств на линию наполнения «раздаточная рампа – котел» (4), замена азотного испарителя в газокомпрессорной установке (5))											X	X	X	X	X	X	X
18	Модернизация системы охлаждения ЭМА (установка потокомеров, термодатчиков с уставкой аварийных состояний, автоматической запорной арматуры, установка системы удаленного управления основным и резервным чиллерами, подключение системы охлаждения магнита)												X	X				
19	Регулировка (строго в одной плоскости) и частичная замена игл в коронирующем триоде. Изменение конфигурации перезарядных щеток: разделение монолитных пластин на три секции.													X				
20	**Специализированная лаборатория в здании 120.** Косметический ремонт помещений специализированной лаборатории в здании 120 Электрификация помещений лаборатории, подготовка ТЗ (1), монтаж коммуникаций (2) Оснащение специализированной лаборатории в здании 120	X	X	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	X	X	X
21	Модернизация **ускорительной экспериментальной инфраструктуры** Разработка узлов и монтаж **имплантора «Днепр»** (1), интеграция имплантора «Днепр» в инфраструктуру ЭСУ ЭГ-5 (2), установка высокопроизводительной RBS – камеры (3))	X	X	X	X									X X				
22	Реставрация Пультовой														X	X	X	
23	**Автоматизация основных технических систем ЭСУ** (Системы проводки пучка, включая систему позиционирования и пространственной стабилизации пучка (1), вакуумной системы (2), зарядотранспортной системы (3), системы управления электростатическим корректором (4) , системы управления перезарядной лентой (5), системы управления поворотными дверьми (6), системы стабилизации энергии и потенциала кондуктора (7), стабилизации тока магнита по ЯМР (8), подготовка ПО (9)) / ООО «Спецатомсервис»											X	X	X	X	X	X	X
24	Подготовка научного и технического персонала											X	X	X	X			
25	Возобновление эксплуатации ЭСУ ЭГ-5 (без газокомпрессорной станции) в тестовом режиме											X						
26	**Возобновление эксплуатации ЭСУ** ЭГ-5 вместе с ГКС. Начало работ на физический эксперимент.													X				
27	Ввод в эксплуатацию ЭСУ в новой конфигурации																	X

Приложение 10

Заявленные к получению результаты по годам согласно ПТП ОИЯИ (2024 - 2026) с указанием сроков и степени выполнения

	Содержание работ	2024				2025				2026				2027			
		1 кв	2 кв	3 кв	4 кв	1 кв	2 кв	3к в	4 кв	1 кв	2 кв	3 кв	4 кв	1 кв	2к в	3 кв	4 кв
1	Модернизация вакуумной системы					X											
2	Автоматизация всех сервисных систем ускорителя					X											
3	Замена сельсиновой системы управления оптоэлектронным аналогом																
4	Замена утратившей рабочие характеристики высоковольтной ускорительной трубки и источника ионов					X											
5	Достижение тока ионного пучка свыше 100мкА					X											
6	Улучшение и настройка параметров ионной оптики ускорителя ЭГ-5 (перенастройка с режима фокуссатора на конденсор)					X											
7	Модернизация и автоматизация газобаллонного хозяйства, адаптация технологической схемы					X											
8	Сертификация и ввод в эксплуатацию ускорителя ЭГ-5 и его экспериментальных залов в тестовом режим					X			X								
9	Ввод в эксплуатацию лаборатории для инжиниринга и исследования образцов методами, комплементарными ионно-лучевым					X											X
10	Формирование кадрового потенциала группы					X											
11	Выполнение технических проектов с АО «Микрон» и Госкорпорацией «РОСАТОМ»					X											
12	Замена сельсиновой системы управления оптоэлектронным аналогом									X							
13	Модернизация системы радиационного контроля и защиты персонала									X							
14	Модернизация комплекса ионно-лучевых спектрометров									X							
15	Введение в эксплуатацию твердотельной литиевой нейтронпроизводящей мишени									X							
16	Автоматизация сервисных систем ускорителя									X			X				X
17	Работа на физический эксперимент со старым ионным источником и ускорительной трубкой												X				X
18	Разработка системы управления новым источником ионов												X				
19	Получение новой ускорительной трубки и ее монтаж вместе с новым источником ионов												X				
20	Ввод в эксплуатацию газокомпрессорной станции												X				
21	Ввод в эксплуатацию СРК и и СБиС										X						
22	Ввод в эксплуатацию ЭСУ в базовой комплектации													X			
23	Замена форнасоса откачки котла (Модернизация системы подготовки диэлектрического газа)													X			
24	Замена ионного источника														X		
25	Юстировка ускорителя в новой конфигурации															X	
26	Автоматизация основных технических систем ЭСУ																X
27	Ввод в эксплуатацию ЭСУ в новой конфигурации																X
28	Изготовление ускорительной трубки														X		

Условные обозначения

X – Выполнено (на момент заседания ПКК);

X - Выполнено частично

X – Не выполнено

X – Запланировано