

Развитие установок ОИЯИ

Главной целью проекта NICA является создание ускорительного комплекса, позволяющего проводить исследования со встречными пучками ионов высокой интенсивности (вплоть до Au^{+79}) со средней светимостью $L = 10^{27} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ в диапазоне энергий $\sqrt{s_{NN}} = 4\text{--}11$ ГэВ, с пучками поляризованных протонов ($\sqrt{s_{NN}}$ до 26 ГэВ) и дейтронов ($\sqrt{s_{NN}}$ до 12 ГэВ) с продольной и поперечной поляризацией, а также с выведенными пучками ионов и поляризованных протонов и дейтронов.

Для эффективного использования возможностей комплекса NICA будут специально созданы и введены в эксплуатацию экспериментальные установки: установка **BM@N** для выведенных пучков и установки **MPD** и **SPD** для коллайдера.

Предусмотрены следующие этапы строительства, сдачи в эксплуатацию и разработки элементов комплекса NICA.

1. Сдача в эксплуатацию базовых элементов NICA (в соответствии с расписанием: бустер — 2020 г.; базовая конфигурация коллайдера — 2022–2023 г.; проектная конфигурация коллайдера — 2025 г.). Создание экспериментальных зон и каналов выведенных пучков комплекса NICA — 2022 г.).

2. Создание и запуск инфраструктуры для проведения исследований в области адронной лучевой терапии и других прикладных исследований в области радиобиологии и устойчивой к облучению микроэлектроники на базе ускорительного комплекса ЛФВЭ — 2017–2023 гг.

3. Запуск начальной конфигурации установки BM@N для пучков легких ионов с высокой интенсивностью, выведенных из нуклотрона, — 2017 г.

4. Завершение модернизации и сдача в эксплуатацию установки BM@N для пучков тяжелых ионов высокой интенсивности, выведенных из нуклотрона, — 2021 г.

5. Пуск первой очереди установки MPD — 2022 г.

6. Сдача в эксплуатацию второй очереди установки MPD — 2025 г.

7. Введение в эксплуатацию начальной конфигурации детектора SPD — 2025 г.

Развитие комплекса NICA (материальные затраты, тыс. долл. США)

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Итого |
|---|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Инжекционный комплекс | 1 739,5 | 2 633,2 | 2 497,3 | 1 325,5 | 1 368,1 | 1 464,4 | 1 215,0 | 12 243,1 |
| Бустер NICA | 4 157,4 | 4 334,0 | 3 240,2 | 1 464,3 | 1 148,5 | 454,0 | 354,1 | 15 152,5 |
| Нуклотрон | 674,5 | 423,8 | 395,2 | 289,0 | 1 041,3 | 547,9 | 180,0 | 3 551,6 |
| Коллайдер | 9 077,3 | 13 237,2 | 8 864,7 | 8 405,1 | 5 922,3 | 12 722,0 | 7 724,3 | 65 952,9 |
| Криогенный комплекс | 933,8 | 1 278,4 | 511,2 | 1 252,3 | 785,7 | 520,0 | 80,0 | 5 361,4 |
| Детектор BM@N | 1 921,0 | 1 574,9 | 2 419,8 | 1 430,5 | 2 166,0 | 1 316,0 | 384,2 | 11 212,4 |
| Детектор MPD | 6 735,6 | 12 178,4 | 8 766,2 | 8 806,5 | 8 332,0 | 11 784,4 | 8 940,0 | 65 543,1 |
| Детектор SPD | 16,1 | 759,1 | 941,8 | 455,7 | 116,6 | 163,5 | 298,0 | 2 750,9 |
| Научно-технологическая база сборки, испытаний, сертификации СП магнитов и склад | 808,4 | 1 346,1 | 1 193,4 | 387,2 | 136,6 | 210,0 | 140,0 | 4 221,7 |
| Информационно-компьютерный комплекс | 438,6 | 657,0 | 312,8 | 68,5 | 233,0 | 415,0 | 390,0 | 2 514,8 |
| Инфраструктура комплекса NICA | 11 815,0 | 8 013,5 | 9 712,6 | 8 315,2 | 28 063,8 | 23 702,9 | 6 994,4 | 96 617,4 |
| Прочие расходы | 7,4 | 25,8 | 17,1 | 14,6 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 64,8 |
| Итого | 38 324,6 | 46 461,3 | 38 872,4 | 32 214,4 | 49 313,9 | 53 300,0 | 26 700,0 | 285 186,6 |

Фабрика сверхтяжелых элементов, базирующаяся на специализированном циклотроне DC-280 и оснащенная экспериментальными установками нового поколения, является важнейшей составляющей проекта DRIBs-III (Dubna Radioactive Ion Beams). Полномасштабная реализация этого проекта — приоритетная задача Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова на период 2017–2023 гг., что позволит существенно расширить возможности проведения фундаментальных и прикладных ядерно-физических исследований в ОИЯИ на высочайшем уровне в широкой кооперации с научными центрами государственных институтов и других стран.

Следующие этапы являются главными в реализации проекта DRIBs-III.

1. Получение пучков ускоренных ионов на циклотроне DC-280 с максимальной интенсивностью до 10 мкА по частицам для изотопов с $A < 100$ с плавной перестройкой энергии, получение высокоинтенсивных пучков стабильных редких изотопов (^{36}S , ^{48}Ca и т. д.), а также пучков долгоживущих радиоактивных ядер, таких как ^{36}Ar , ^{50}Ni , создание инфраструктуры для проведения на пучках ускорителя DC-280 экспериментов на установках, созданных в других исследовательских центрах, — 2017–2023 гг.

2. Реконструкция циклотрона U400M с целью получения интенсивных пучков ионов радиоактивных изотопов и расширения возможностей изучения нуклидов на границах протонной и нейтронной стабильности, изучение взаимодействий нуклидов с максимальными избытками протонов и нейтронов, создание нового высокоэффективного сепаратора ACCULINNA-II — 2019 г.

3. Реконструкция циклотрона U400 → U400R с целью расширения ассортимента ускоряемых ионов от гелия до урана, снижения энергетического разброса ускоренных ионов до 0,3 %, обеспечения плавной перестройки энергии ионов в диапазоне 0,8–25 МэВ·А, снижения энергопотребления и повышения долговременной стабильности работы ускорителя, получения пучков ионов редких стабильных изотопов, короткоживущих изотопов с временами жизни $T_{1/2} \geq 0,1$ с, инжектируемых либо непосредственно в вертикальный канал циклотрона, либо в ионный источник; расширение площади экспериментального зала до 1500 м² с обеспечением работы в шести радиационно-защищенных кабинах — 2020–2023 гг.

4. Создание экспериментальных установок длительного действия — сепараторов и многопараметрических детекторных систем.

**График финансирования и реализации основных составляющих проекта DRIBs-III
на период 2017–2023 гг. (тыс. долл. США)**

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Всего |
|--|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Фабрика СТЭ | | | | | | | | |
| Завершение строительства экспериментального корпуса | 2 800,0 | 1 285,0 | 45,0 | 5,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 4 135,0 |
| Ускоритель DC-280 | 1 230,0 | 140,0 | 450,0 | 255,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 075,0 |
| Создание новых физических установок | 3 440,0 | 1 450,0 | 1 060,0 | 2 370,0 | 2 420,0 | 2 100,0 | 1 400,0 | 14 240,0 |
| Ускорительный комплекс U400R | | | | | | | | |
| Строительство монтажного зала | 90,0 | 455,0 | 460,0 | 1 460,0 | 720,0 | 0,0 | 0,0 | 3 185,0 |
| Строительство экспериментального зала | 10,0 | 240,0 | 65,0 | 320,0 | 1 550,0 | 3 400,0 | 2 700,0 | 8 285,0 |
| Модернизация циклотрона U400 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 410,0 | 140,0 | 2 200,0 | 2 000,0 | 4 750,0 |
| Модернизация циклотрона U400M | | | | | | | | |
| Модернизация циклотрона U400M | 2 240,0 | 1 820,0 | 1 760,0 | 1 500,0 | 1 550,0 | 250,0 | 0,0 | 9 120,0 |
| Ускорительный комплекс DC-140 | | | | | | | | |
| Создание циклотрона DC-140 (модернизация U200→DC-140) | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 500,0 | 2 600,0 | 1 900,0 | 7 000,0 |
| Проект радиохимического комплекса I класса | | | | | | | | |
| Проект РХЛ I класса | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 200,0 | 500,0 | 500,0 | 1 200,0 |
| Создание новых и реконструкция действующих установок на U400R и U400M | | | | | | | | |
| Электромагнитные сепараторы, системы детектирования | 3 290,0 | 3 320,0 | 3 100,0 | 2 930,0 | 2 260,0 | 1 350,0 | 2 370,0 | 18 620,0 |
| Поддержка экспериментов | | | | | | | | |
| Проведение экспериментов | 2 990,0 | 2 850,0 | 2 900,0 | 1 390,0 | 2 750,0 | 2 600,0 | 2 200,0 | 17 680,0 |
| Итого | 16 090,0 | 11 560,0 | 9 840,0 | 10 640,0 | 14 090,0 | 15 000,0 | 13 070,0 | 90 290,0 |

Время работы ускорителей (пучок на мишени) (час)

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Итого |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| U400/U400R | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 3 000 | 0 | 28 000 |
| U400M | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 2 500 | 0 | 2 000 | 5 000 | 24 500 |
| DC-280 | 0 | 0 | 3 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 5 000 | 23 000 |
| Итого | 10 000 | 10 000 | 13 000 | 12 500 | 10 000 | 10 000 | 10 000 | 75 500 |

Реактор ИБР-2 является базовой установкой ОИЯИ для нейтронных исследований в области физики конденсированных сред и **единственной в странах-участницах ОИЯИ**. В рамках выполнения предыдущего семилетнего плана были созданы первые холодные замедлители, количество спектрометров реактора для исследования конденсированных сред было увеличено с 11 до 14, проведена существенная модернизация ряда действующих спектрометров.

Программа развития реактора ИБР-2 на 2017–2023 гг.

1. Освоение и эксплуатация комплекса криогенных замедлителей. Приобретение и запуск в эксплуатацию новой холодильной машины для каналов 4–6. Развитие систем управления и контроля комплекса криогенных замедлителей КЗ-201, КЗ-202, КЗ-203 реактора ИБР-2. Создание резервного подвижного отражателя ПО-3Р.

2. Обновление технологического оборудования реактора с истекающими сроками службы (воздушные теплообменники, электромагнитные насосы и т. д.).

Новый источник нейтронов ОИЯИ

1. Разработка концептуального проекта нового источника нейтронов.
2. Разработка эскизного проекта нового источника нейтронов.
3. Разработка топливной загрузки для нового источника.
4. Моделирование экспериментальной инфраструктуры нового источника, включая элементы экспериментальных установок с прототипированием отдельных компонентов на ИБР-2.

Программа развития комплекса спектрометров на ИБР-2

1. Работы по созданию окончательной конфигурации и развитию новых спектрометров ДН-6, ГРЭИНС, томографии и радиографии, FSS.

2. Модернизация и реконструкция существующих спектрометров реактора ИБР-2 с целью улучшения их параметров, расширения экспериментальных возможностей и обеспечения бесперебойной работы, включая развитие систем формирования пучка, нейтронных детекторов, систем окружения образца, криостатов и криомагнитных систем, а также электроники и программного обеспечения систем сбора данных.

3. Разработка и создание основной конфигурации нового спектрометра малоуглового рассеяния на реакторе ИБР-2.

**График финансирования реактора ИБР-2 с комплексом спектрометров
на 2017–2023 гг. (тыс. долл. США)**

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Итого |
|--|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| Работы по созданию окончательной конфигурации и развитию новых спектрометров ДН-6, ГРЭИНС, томографии и радиографии, FSS | 350,0 | 427,1 | 413,5 | 115,6 | 81,8 | 97,6 | 81,9 | 1 567,5 |
| Модернизация и реконструкция существующих спектрометров реактора ИБР-2 | 578,6 | 1218,8 | 518,5 | 1159,2 | 90,0 | 151,6 | 53,2 | 3 769,9 |
| Разработка и создание основной конфигурации нового спектрометра малоуглового рассеяния | 115,0 | 228,7 | 199,0 | 196,2 | 411,0 | 270,3 | 193,1 | 1 613,3 |
| Приобретение материалов и оборудования за счет грантов полномочных представителей, программ сотрудничества и совместных проектов со странами-неучастницами | 1045,4 | 779,6 | 688,7 | 728,8 | 0 | 0 | 0 | 3 242,5 |
| Оптические методы исследований | 196,7 | 87,9 | 87,4 | 86,5 | 103,0 | 61,6 | 42,2 | 665,3 |
| Развитие реактора ИБР-2 с комплексом криогенных замедлителей | 1537,8 | 2 893,0 | 3 214,0 | 1 075,5 | 2 652,7 | 1 996,7 | 1 426,2 | 14 795,9 |
| Разработка систем контроля и управления для холодных замедлителей нейтронов и исполнительных механизмов спектрометров | 263,8 | 525,3 | 595,3 | 525,9 | 341,0 | 302,4 | 216,0 | 2 769,7 |
| Разработка детекторов, систем окружения образца, систем сбора и накопления данных; развитие информационно-вычислительной инфраструктуры ЛНФ | 535,6 | 1 066,5 | 1 184,2 | 1 048,0 | 1 042,3 | 619,9 | 387,4 | 5 883,9 |
| Эксплуатация ИБР-2 | 219,5 | 151,9 | 312,7 | 384,3 | 317,5 | 350,0 | 350,0 | 2 085,9 |
| Итого | 4842,4 | 7 378,8 | 7 213,3 | 5 320,0 | 5 039,3 | 3 850,0 | 2 750,0 | 36 393,8 |

Лаборатория структурных исследований SOLCRYS

Исследования конденсированных сред в ОИЯИ ведутся в области изучения новых материалов (катализаторов, полимеров и т. д.), наноматериалов (наночастиц, нанокompозитов и т.д.), материалов в экстремальных условиях (сверхпроводников, перовскитов и т.д.) и биоматериалов (белков, ДНК и т.д.). Методы исследования, основанные на рассеянии синхротронного излучения, будут развиваться на базе Национального центра синхротронного излучения SOLARIS Ягеллонского университета в Кракове (Польша), где ОИЯИ предлагает создать новую Лабораторию структурных исследований SOLCRYS. Планируется создание трех измерительных станций:

- для макромолекулярной рентгеновской кристаллографии;
- для малоуглового рентгеновского рассеяния;
- для порошковой дифракции.

Программа строительства лаборатории SOLCRYS на 2020–2023 годы

1. Расширение существующего экспериментального зала для размещения конечных станций кристаллографической линии, а также лаборатории для подготовки образцов.

2. Разработка и развитие технической инфраструктуры в объеме, необходимом для установки и правильной эксплуатации исследовательского оборудования лаборатории SOLCRYS.

3. Проектирование, приобретение и установка исследовательской инфраструктуры, в том числе:

а) разработка, закупка и установка сверхпроводящего вигглера в качестве источника излучения в рентгеновском диапазоне с верхней энергией фотонов не менее 20 кэВ;

б) проектирование, приобретение и установка исследовательской линии для дифракционных исследований, в том числе:

– вакуумная система, разделяющая синхротрон и линию — так называемый передний конец;

– инфраструктура линии, состоящая из вакуумных систем, систем наведения и контроля луча, оптики и монохроматоров;

в) проектирование, закупка и установка измерительной станции для дифракционных исследований;

г) строительство измерительных станций для исследований малоуглового рассеяния рентгеновских лучей (SAXS) и широкоугольного рассеяния рентгеновских лучей (WAXS);

д) проектирование и сборка систем управления, а также систем сбора и хранения данных;

е) строительство объектов для подготовки образцов.

Традиционная научно-исследовательская деятельность ОИЯИ в области **нейтронной ядерной физики** будет осуществляться на нейтронном источнике высокого разрешения – ИРЕН.

Дальнейшее развитие установки ИРЕН в 2017–2023 гг. связано с усовершенствованием систем ускорителя и модернизацией инфраструктуры экспериментального зала и павильонов, включая:

1) переход на новые клистроны, которые позволят поднять частоту нейтронных импульсов с 50 до 120 Гц;

2) оптимизацию источника электронов, процессов формирования пучка электронов и его транспорта, которая позволит повысить эффективность ускорителя;

3) модернизацию экспериментального зала для обеспечения инфраструктуры экспериментальных установок на мировом уровне.

График финансирования установки ИРЕН на 2017–2023 гг. (тыс. долл. США)

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Итого |
|---|----------------|----------------|--------------|--------------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| Техническое обслуживание и эксплуатация | 230,0 | 200,7 | 478,8 | 157,5 | 28,8 | 150,0 | 150,0 | 1 395,8 |
| Совершенствование систем ускорителя | 1 058,5 | 932,2 | 358,5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 2 349,2 |
| Итого | 1 288,5 | 1 132,9 | 837,3 | 157,5 | 28,8 | 150,0 | 150,0 | 3 745,0 |

Нейтринный телескоп гигатонного объема (Baikal-GVD) на озере Байкал представляет собой результат исследовательских разработок и натурных испытаний, выполненных коллаборацией «Байкал» в первой фазе этого проекта в течение прошедших нескольких лет. За это время были изучены оптические свойства воды на глубине озера Байкал и продемонстрирована принципиальная возможность детектирования космических нейтрино высоких энергий с помощью прототипа детектора NT200/NT200+. Эти достижения позволили доказать правильность концепции, заложенной в основу создания новой установки — Baikal-GVD, которая будет обладать уникальными детектирующими характеристиками и иметь эффективный рабочий объем масштаба кубического километра.

В рамках текущего семилетнего плана обязательства ОИЯИ в части создания нейтринного телескопа Baikal-GVD заключаются в том, чтобы ввести в эксплуатацию 12 кластеров и завершить первый этап создания детектора. 2022–2023 годы будут использованы для изучения возможности технологической модернизации установки Baikal-GVD в рамках подготовки следующего этапа развития.

Во второй фазе своего развития нейтринный телескоп Baikal-GVD будет представлять собой новую исследовательскую инфраструктуру, нацеленную в первую очередь на исследование потоков нейтрино астрофизического происхождения. Детектор будет использовать воду Байкала в качестве детектирующей субстанции, в которую помещены оптические сенсоры, регистрирующие черенковское излучение от вторичных частиц, возникающих в результате взаимодействий высокоэнергичных нейтрино внутри рабочего объема детектора или в непосредственной близости к нему. Концепция установки Baikal-GVD базируется на нескольких достаточно очевидных требованиях к дизайну и архитектуре системы сбора информации с распределенного массива детектирующих кластеров. Это максимальное использование преимуществ развертывания данного массива на ледяном покрове озера, возможность масштабирования установки и обеспечение ее эффективной работы даже на самом первом этапе (с малым числом кластеров), а также возможность различных вариантов расположения светорегистрирующих сенсоров в пределах одной измерительной системы.

График финансирования проекта Baikal-GVD на 2017–2023 гг. (тыс. долл. США)

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Всего |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| ФЭУ Hamamatsu R7081-100 | 1 930,0 | 1 974,0 | 1 970,0 | 2 040,0 | 2 050,0 | 1 000,0 | 0,0 | 10 964,0 |
| Оптические модули с разъемами | 2 315,0 | 1 538,0 | 1 331,0 | 1 365,0 | 1 000,0 | 700,0 | 0,0 | 8 249,0 |
| Электроника и компьютеринг | 2 550,0 | 1 920,0 | 1 850,0 | 1 900,0 | 1 120,0 | 1 000,0 | 1 400,0 | 11 740,0 |
| Подводные кабели | 519,0 | 583,0 | 1 258,0 | 2 020,0 | 2 050,0 | 500,0 | 0,0 | 6 930,0 |
| Локальная инфраструктура | 846,0 | 835,0 | 731,0 | 625,0 | 798,1 | 800,0 | 800,0 | 5 435,1 |
| Всего | 8 160,0 | 6 850,0 | 7 140,0 | 7 950,0 | 7 018,1 | 4 000,0 | 2 200,0 | 43 318,1 |

План создания детектора GVD

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 | Всего |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| Установка кластеров по годам | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 12 |
| Кластеров в детекторе | 2 | 4 | 6 | 8 | 9 | 11 | 12 | 12 |
| Производство оптических модулей | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 600 | 300 | 3 556 |