

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 — 2018 г.; начальная конфигурация коллайдера — 2020 г.; проектная конфигурация коллайдера — 2023 г.). Создание экспериментальных зон и каналов выведенных пучков комплекса NICA (каналы транспортировки тяжелых и легких ионов, поляризованных частиц, тестовый канал и соответствующая инфраструктура — 2017–2019 гг.).

2. Создание и запуск инфраструктуры для проведения 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, — 2019 г.

5. Пуск первой очереди установки MPD — 2019 г.

6. Сдача в эксплуатацию второй очереди установки MPD — 2023 г.

7. Пуск установки SPD — 2023 г.

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

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Итого
Инжекционный комплекс	405,7	358,3	331,4	309,3	717,9	686,2	149,4	2 958,2
Бустер	5 907,4	2 319,8	890,2	112,5	0,0	0,0	0,0	9 229,9
Нуклотрон	434,7	330,1	615,5	553,0	258,4	0,0	0,0	2191,7
Коллайдер	8 196,2	8 195,1	16 36,6	16 943,2	10723,8	5 318,8	2 682,5	68 196,2
Криогенный комплекс	4 118,8	4 775,8	2 091,3	1 398,5	687,2	714,0	713,4	14 499,0
BM@N	1 380,8	1 222,0	1 139,5	1 041,0	885,9	736,4	643,7	7049,3
MPD	10 203,3	10 34,1	6 281,2	6 870,3	5 781,3	4 447,7	3 259,4	46 877,3
SPD	92,1	87,3	87,7	468,6	497,7	5 664,4	7 556,8	14 454,6
Мастерская по изготовлению магнитов	242,1	232,0	233,0	230,6	235,5	49,7	39,7	1 262,6
Информационно-вычислительная система	154,4	159,1	383,3	372,3	244,5	254,0	253,7	1 821,3

Инфраструктура комплекса NICA	25 831,6	20 94,1	7 538,0	93,7	76,6	49,7	49,7	53 933,4
Прочие расходы	2 000,0	2 050,0	2 100,0	2 250,0	2 300,0	2 350,0	2 400,0	15 450,0
Итого	58967,1	50 57,7	37 27,7	30 643,0	22408,8	20270,9	17748,3	237 923,5

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 государств-членов института 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								
Создание новых физических установок (газовый сборник, пресеPARATOR для экспериментов по химии, детектирующие модули)	5 400,0	3 600,0	4 400,0	2 800,0	1 700,0	2 500,0	3 500,0	23 900,0
Экспериментальный зал U400R								
Реконструкция систем обеспечения здания 131	300,0	1 400,0	1 100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2 800,0
Реконструкция экспериментального зала	0,0	500,0	300,0	4 700,0	6 700,0	3 000,0	0,0	15 200,0
Подытог:	300,0	1 900,0	1 400,0	4 700,0	6 700,0	3 000,0	0,0	18 000,0
Модернизация циклотрона U400 → U400R								
Комплектование систем	0,0	0,0	0,0	1 400,0	1 400,0	0,0	0,0	2 800,0
Каналы пучков	0,0	0,0	0,0	500,0	1 000,0	2 000,0	2 000,0	5 500,0
Подытог:	0,0	0,0	0,0	1 900,0	2 400,0	2 000,0	2 000,0	8 300,0
Модернизация циклотрона U400M								
Новая обмотка электромагнита	1 000,0	900,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1 900,0
Вакуумные и диагностические системы	800,0	1 400,0	500,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2 700,0
Автоматизированная система радиационного контроля	200,0	300,0	300,0	0,0	0,0	0,0	0,0	800,0
Подытог:	2 000,0	2 600,0	800,0	0,0	0,0	0,0	0,0	5 400,0
Создание новых и реконструкция действующих установок на U400R и U400M								
Электромагнитные сепараторы, системы детектирования α-, β-, γ-излучений и нейтронов	2 400,0	1 400,0	3 800,0	900,0	1 000,0	4 200,0	6 000,0	19 700,0

Поддержка экспериментов								
Проведение экспериментов (мишени, обогащенные изотопы, детекторы, жидкий азот)	3 900,0	4 300,0	3 800,0	3 800,0	2 900,0	4 000,0	4 500,0	27 200,0
Итого	14 000,0	13 800,0	14 200,0	14 100,0	14 700,0	15 700,0	16 000,0	102 500,0

Время работы ускорителей (пучок на мишени) (час)

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Итого
U400/U400R	5 000	5 000	5 000	2 500	0	0	2 500	20 000
U400M	5 000	5 000	0	2 500	5 000	5 000	5 000	27 500
DC-280	0	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	5 000	30 000
Итого	10 000	15 000	10 000	10 000	10 000	10 000	12 500	77 500

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.).

3. Технико-экономическое обоснование разработки нового источника нейтронов (НИС). Предпроектные работы по НИС.

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	602,3	580,4	557,5	500,6	469,4	465,3	447,2	3 622,7
Модернизация и реконструкция существующих спектрометров реактора ИБР-2	481,0	483,6	532,9	616,2	638,5	839,1	968,8	4 560,1
Разработка и создание основной конфигурации нового спектрометра малоуглового рассеяния	314,6	251,5	236,9	269,6	338,0	267,0	223,6	1 901,2
Оптические методы исследований	55,0	56,0	57,0	59,0	60,0	62,0	63,0	412,0
Развитие реактора ИБР-2 с комплексом криогенных замедлителей	1 793,7	1 786,2	1 967,6	1 754,6	1 509,7	1 558,5	1 603,0	11 973,3
Разработка систем контроля и управления для холодных замедлителей нейтронов и исполнительных механизмов спектрометров	305,7	249,9	254,1	211,8	206,6	183,1	178,9	1 590,1
Разработка детекторов, систем окружения образца, систем сбора и накопления данных; развитие информационно-вычислительной инфраструктуры ЛНФ	952,0	854,4	951,0	1 005,2	1 062,8	1 190,0	1 259,5	7 274,9
Эксплуатация ИБР-2	348,0	893,0	759,0	827,0	849,0	916,0	952,0	5 544,0
Итого	4 852,3	5 155,0	5 316,0	5 244,0	5 134,0	5 481,0	5 696,0	36 878,3

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	400,0	428,0	458,0	490,0	524,0	1 160,0	1 200,0	4 660,0
Совершенствование систем ускорителя	673,0	700,0	700,0	500,0	300,0	200,0	100,0	3 173,0
Модернизация экспериментального зала ИРЕН	781,0	912,0	1 025,0	1 346,0	1 676,0	1 515,0	1 563,0	8 818,0
Итого	1 854,0	2 040,0	2 183,0	2 336,0	2 500,0	2 875,0	2 863,0	16 651,0

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.

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	2 100,0	2 100,0	2 100,0	2 100,0	2 100,0	2 100,0	2 100,0	14 700,0
Оптические модули с разъемами	1 000,0	1 000,0	1 000,0	1 000,0	1 000,0	1 000,0	1 000,0	7 000,0
Электроника и компьютеринг	1 100,0	1 250,0	1 400,0	1 400,0	1 400,0	1 400,0	1 400,0	9 350,0
Подводные кабели	500,0	500,0	700,0	700,0	700,0	700,0	700,0	4 500,0
Локальная инфраструктура	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0	800,0	5 600,0
Всего	5 500,0	5 650,0	6 000,0	6 000,0	6 000,0	6 000,0	6 000,0	41 150,0

План создания детектора GVD

	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Всего
Установка кластеров по годам	1	2	2	2	2	3	3	15
Кластеров в детекторе	2	4	6	8	10	13	16	59
Производство оптических модулей	600	600	600	600	900	900	900	5100