

КАНАЛЫ И СТАНЦИИ ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

*Г. А. Филатов^{а,1}, А. А. Сливин^а, Е. М. Сыресин^а, А. В. Бутенко^а,
А. С. Ворожцов^а, А. В. Агапов^а, К. Н. Шипулин^а, С. Ю. Колесников^а,
А. Р. Галимов^а, А. М. Тихомиров^а, В. И. Тюлькин^а, Д. Е. Донец^а,
Д. С. Леткин^а, Д. О. Леушин^а, А. В. Тузиков^а, А. А. Балдин^а,
Д. С. Коровкин^а, Г. Н. Тимошенко^а, Т. В. Кулевой^б, Ю. Е. Титаренко^б,
Д. В. Бобровский^{в,г}, А. И. Чумаков^{в,г}, С. А. Соловьев^{в,г},
А. С. Кубанкин^д, Д. Г. Фирсов^д, Ю. С. Кубанкин^д, П. Н. Черных^е,
С. В. Осипов^е, Е. Г. Серенков^е, С. А. Четвериков^ж*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

^в Специализированные электронные системы (СПЭЭС), Москва

^г Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

^д ООО «Вакуумные системы и технологии» (ВСТ), Белгород, Россия

^е ООО «ОСТЕК-ЭК», Москва

^ж ООО «ГИРО-ПРОМ», Дубна, Россия

В состав ускорительного комплекса NICA входят каналы транспортировки пучков и станции для прикладных исследований. Первый физический пуск был проведен на станции облучения чипов (СОЧИ) с пучками ионов C^{4+} при энергии 3,2 МэВ/нуклон, выведенных из линейного ускорителя тяжелых ионов (ЛУТИ). Новый канал транспортировки СОЧИ интегрирован в имеющийся канал ЛУТИ–бустер. Испытательная станция компонентов радиоэлектронной аппаратуры (ИСКРА) с энергий ионов 150–500 МэВ/нуклон и станция исследований медико-биологических объектов (СИМБО) с энергией ионов 400–1100 МэВ/нуклон обеспечиваются пучками, выводимыми из нуклотрона. Оборудование для СИМБО и ИСКРА изготовлено, его монтаж был запланирован на конец 2022 г. Каналы транспортировки к этим станциям находятся на стадии разработки. Приведены технические характеристики каналов и станций, а также обсуждаются результаты первого физического пуска СОЧИ.

The NICA accelerator complex includes areas for applied research. The first commissioning of the Station Of CHip Irradiation (SOCHI) was performed at the end of 2021 with C^{4+} heavy ions extracted from linear accelerator (HILAC) at the energy 3.2 MeV/nucleon. The new SOCHI beam transfer line is integrated in the existing HILAC–Booster beam line. The Irradiation Setup for Components of Radioelectronic Apparatus (ISCRA) with the ion energy range of 150–500 MeV/nucleon and the Setup for Investigation of Medical Biological Objects (SIMBO)

¹E-mail: filatov@jinr.ru

with the ion energy range of 400–1100 MeV/nucleon are based on beams extracted from Nuclotron. The equipment of ISCRA and SIMBO stations was constructed and was planned to be mounted at the end of 2022. Beam lines are under design now. The technical highlights of the beam lines and stations and the SOCHI first beam run results are given.

PACS: 29.20.—с

ВВЕДЕНИЕ

Для разработки космической техники и планирования длительных полетов требуются исследования, чтобы оценить риски от влияния космического излучения как на биологические, так и на электронные объекты. Проведение таких исследований возможно при облучении специальных мишеней пучками ионов, получаемых на ускорителях. В создаваемых зонах для прикладных исследований на ускорительном комплексе NICA будут проводиться облучения радиобиологических объектов и электронных компонентов. Для этого в каждой из зон планируется работа новых станций и каналов транспортировки пучков, интегрированных в каналы вывода пучка соответствующего ускорителя [1, 2]. Параметры пучков для станций представлены в таблице. Важным элементом каналов и станций являются детекторы, используемые для диагностики пучка как во время настройки, так и во время проведения экспериментов.

Характеристики зон для прикладных исследований

Параметр	СИМБО	ИСКРА	СОЧИ
Тип ионов	$^{40}\text{Ar}^{18+}$, $^{56}\text{Fe}^{26+}$, $^{84}\text{Kr}^{36+}$	$^{12}\text{C}^{4+}$, $^{40}\text{Ar}^{10+}$, $^{131}\text{Xe}^{22+}$, $^{12}\text{C}^{6+}$	$^{131}\text{Xe}^{54+}$, $^{197}\text{Au}^{79+}$, $^{84}\text{Kr}^{14+}$, $^{169}\text{Tm}^{21+}$, $^{197}\text{Au}^{31+}$, $^{209}\text{Bi}^{34+}$
Энергия ионов, МэВ/нуклон	400–1100	150–425	3,2
Интенсивность выводимого пучка, ионы за импульс	$10^6 - 3 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^4 - 10^8$	$10^8 - 6 \cdot 10^9$
Эмиттансы пучка (95%) $\varepsilon_x/\varepsilon_y$, π мм·мрад	3–10/8–15	5–17/13–25	10/10
Средняя во времени плотность потока ионов, $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$10^3 - 10^5$	$10^2 - 3 \cdot 10^5$	$10^3 - 10^5$
Время вывода	2–20 с		0,5–8 мкс

СТАНЦИЯ СОЧИ И КАНАЛ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Станция облучения чипов (СОЧИ) предназначена для прогнозирования, оценки и контроля радиационной стойкости изделий микроэлектроники к воздействию заряженных частиц на пучках, получаемых в линейном ускорителе тяжелых ионов (ЛУТИ). Для мониторинга характеристик пучка используются следующие детекторы: ионизационный детектор на основе микроканальных пластин, система для диагностики и контроля плотности потока ионов и флюенса в гало пучка в режиме реального времени (четыре сцинтилляционных детектора), быстрый сцинтилляционный детектор полного поглощения с оптическим съемом информации, детектор на основе цилиндра Фарадея, быстрый люминофорный детектор полного поглощения с оптическим съемом информации. Внутри вакуумной камеры СОЧИ находятся

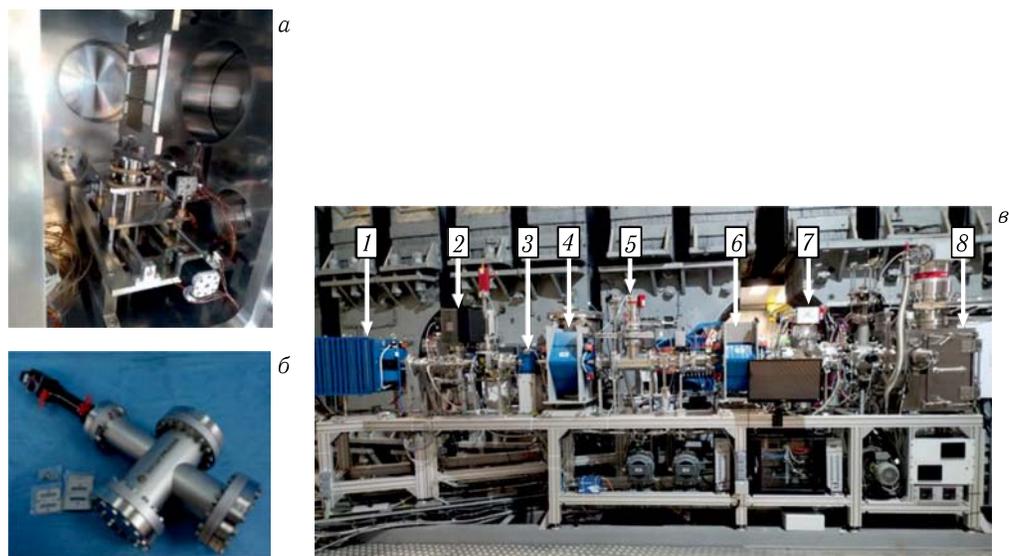


Рис. 1. Внутренний вид станции (а), коллиматорная станция (б), канал и станция СОЧИ (в): 1 — дипольный магнит; 2 — третий вакуумный пост; 3 — корректор; 4 — первая квадрупольная линза; 5 — второй вакуумный пост; 6 — вторая квадрупольная линза; 7 — первый вакуумный пост; 8 — СОЧИ

система позиционирования объекта испытаний, универсальная испытательная плата, кабели, модуль нагрева, быстрый люминофорный детектор полного поглощения и газоанализатор (рис. 1, а). Оборудование для станции СОЧИ разрабатывается в рамках сотрудничества ОИЯИ – НИЦ «Курчатовский институт» с участием СПЭЛС/МИФИ, ООО «ГИРО-ПРОМ», ООО «Вакуумные системы и технологии» (ВСТ) [3].

На СОЧИ будут проводиться эксперименты на различных типах ионных пучков от $^{12}\text{C}^{4+}$ до $^{197}\text{Au}^{31+}$ с энергией 3,2 МэВ/нуклон с рабочими токами от 280 до 2390 нА. При этом импульсные токи пучков, выводимых из ЛУТИ, соответствуют нескольким миллиампер. В результате мощность дозы на кремниевой мишени превышает 1 рад/мкс, что может приводить к искажению результатов ее тестирования за счет вклада эффектов мощности дозы в одиночные радиационные эффекты [4]. Однако для ряда изделий этот порог может быть значительно увеличен по результатам проведения исследований.

Для получения заданного уровня рабочих токов на станции будет применяться устройство для снижения интенсивности пучка — коллиматорная станция (КС). В качестве коллиматора служит фольга из нержавеющей стали толщиной 50 мкм с набором из нескольких конфигураций отверстий. Установка необходимой конфигурации отверстий на оси пучка позволяет регулировать степень уменьшения тока при облучении мишени на станции (см. рис. 1, б).

Канал транспортировки пучка от ЛУТИ до СОЧИ, интегрированный в канал ЛУТИ–бустер, обеспечивает транспортировку пучка от ЛУТИ до СОЧИ и требуемую неоднородность распределения пучка (менее 10%) в области мишени размером 20×20 мм. Для этого используются один дипольный и пять квадрупольных магнитов. Магнитные элементы оптики канала СОЧИ работают в импульсном режиме,

который позволяет снизить среднеквадратичную плотность тока и использовать обмотки магнитов с воздушным охлаждением. Коррекция траектории пучка в канале осуществляется с помощью пары двухкоординатных дипольных магнитов с питанием от постоянных источников [5, 6].

В связи с технологическим процессом работы станции, высоким рабочим вакуумом в ней относительно канала ЛУТИ–бустер и использованием в ней мишеней из материалов, имеющих высокие давления насыщенных паров, в станции будут преобладать молекулы газов с атомной массой $A > 12$ (около 90%). Смесь, состоящая преимущественно из относительно тяжелых газов с $A > 12$, будет мигрировать в сторону канала транспортировки пучка в бустер и ухудшать вакуумный состав газа непосредственно в бустере при давлении около 10^{-9} Па.

Для снижения влияния газового состава станции на вакуумные условия канала ЛУТИ–бустер геометрия канала ЛУТИ–СОЧИ и его вакуумное оборудование выбраны таким образом, чтобы увеличить сопротивление для молекул остаточного газа при его прохождении. Для перехвата молекул этих газов в канале установлены криогенные ловушки и быстродействующие задвижки, которые открываются лишь на короткое время при пролете через них пучка. Расположение насосных групп позволяет эффективно удалять нежелательные компоненты газов в зонах ловушек.

Результаты вакуумных испытаний канала и СОЧИ показали, что давление и состав остаточного газа за дипольным магнитом СОЧИ не превышает предельных значений для канала ЛУТИ–бустер самого бустера.

Канал и станция СОЧИ представлены на рис. 1, в. Длина канала ЛУТИ–СОЧИ составляет около 9 м, длина канала от поворотного магнита до СОЧИ — около 5,5 м.

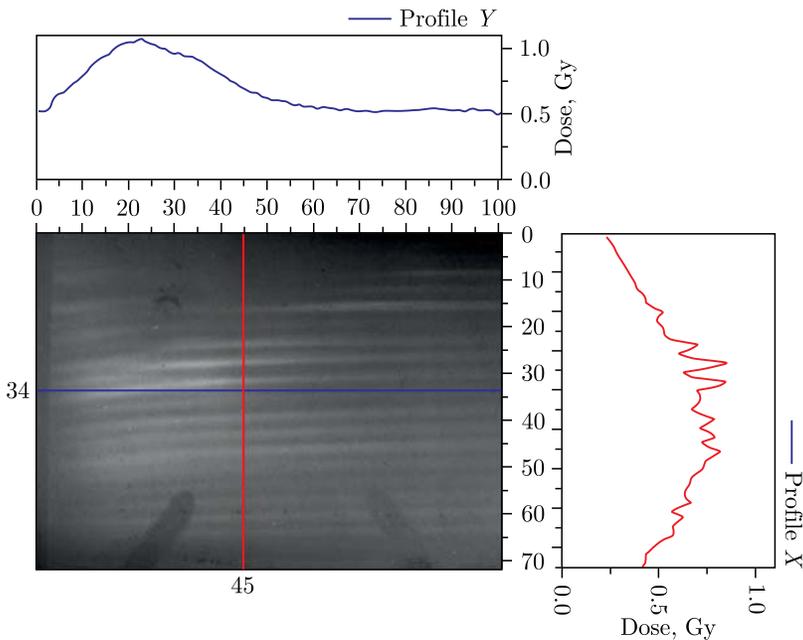


Рис. 2. Профили пучка, полученные на СОЧИ

В декабре 2021 г. был завершён монтаж и проведён первый физический пуск станции с пучками ионов углерода $^{12}\text{C}^{4+}$ с энергией 3,2 МэВ/нуклон. Импульсный ток ионного пучка на выходе из ЛУТИ перед КС составлял 3,5 мА, длительность импульса — 3 мкс с периодом повторения 4 с. В ходе эксперимента для оценки однородности дозного распределения на мишени внутри станции была размещена радиохромная плёнка ЕВТЗ (Ashland Inc., США). Полученные результаты позволили восстановить и оценить профили выведенного пучка (рис. 2).

Для снижения тока пучка на мишени до уровня нескольких сотен наноампер и обеспечения требуемой мощности дозы излучения использовался коллиматор с 20 отверстиями диаметром 30 мкм с шагом 700 мкм между ними. Приведённые на рис. 2 данные указывают на высокую степень неоднородности дозного распределения в области мишени. По результатам анализа полученных данных была рассчитана новая геометрия положения отверстий коллиматора с шагом между горизонтальными отверстиями 150 мкм. Эксперимент на мишени с новой конфигурацией коллиматора будет проведён в рамках дальнейших сеансов на оборудовании СОЧИ.

СТАНЦИИ СИМБО И ИСКРА И КАНАЛЫ ТРАНСПОРТИРОВКИ

Станция исследований медико-биологических объектов (СИМБО) предназначена для проведения радиобиологических исследований с целью моделирования воздействия тяжёлых заряженных частиц галактических и солнечных космических лучей на когнитивные функции мозга приматов и мелких лабораторных животных. Испытательная станция компонентов радиоэлектронной аппаратуры (ИСКРА) предназначена для исследований и испытаний изделий полупроводниковой микро- и нанoeлектроники на стойкость к воздействию тяжёлых заряженных частиц высоких энергий.

Каналы транспортировки пучка СИМБО и ИСКРА разрабатываются в коллаборации ОИЯИ–SigmaPhi (Франция). Оборудование для станции СИМБО разрабатывается в рамках коллаборации ОИЯИ–ВСТ с участием фирмы «ОСТЕК-ЭК» (Москва). Оборудование для ИСКРА разрабатывается в рамках коллаборации ОИЯИ–НИЦ «Курчатовский институт» с участием СПЭЛС/МИФИ, «ГИРО-ПРОМ».

Диагностика каналов и станций представлена набором различных типов детекторов для настройки и контроля пучка во время эксперимента. Детекторы имеют возможность перемещения. Система позиционирования (СП) объекта СИМБО представлена на рис. 3, а. Мишень СИМБО может быть позиционирована по трём декартовым координатам, а также имеет возможности азимутального вращения. СП оборудования ИСКРА приведена на рис. 3, б. Модель конструкции СП детекторов СИМБО показана на рис. 3, в. На рис. 3, г представлена модель конструкции блока детекторов канала из ионизационной камеры (ИК), сцинтилляционно-файберного детектора (СФ) и онлайн-детектора (ОД). Мониторинг пучка во время его настройки осуществляется с помощью СФ и ИК, позволяющих измерить профили и плотность потока пучка. ОД в конструкции из четырёх подвижных детекторов измеряет плотность потока в ореоле пучка для контроля его параметров в режиме реального времени [7, 8].

На рис. 4 показан ОД ореола пучка, работающий в режиме реального времени на СИМБО, и четыре его сцинтилляционных детектора ионов (рис. 4, а, б), а также модель всей конструкции ОД (рис. 4, в), позволяющая осуществить подстройку сцинтилляторов детектора в соответствии с размерами пучка.

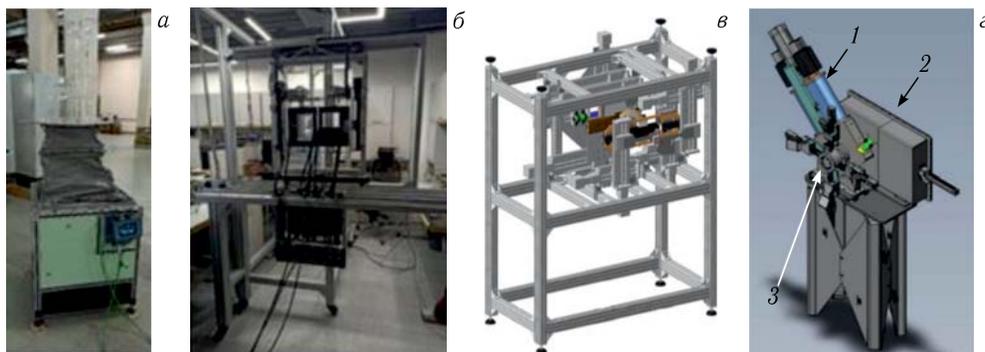


Рис. 3. СП объекта СИМБО (а) [7], СП оборудования ИСКРА (б) [8], модель СП детекторов СИМБО (в) и модель блока детекторов канала (з) [7]: 1 – СФ; 2 – ИК; 3 – ОД



Рис. 4. ОД СИМБО: сцинтилляционные детекторы (а, б) и модель ОД (в)

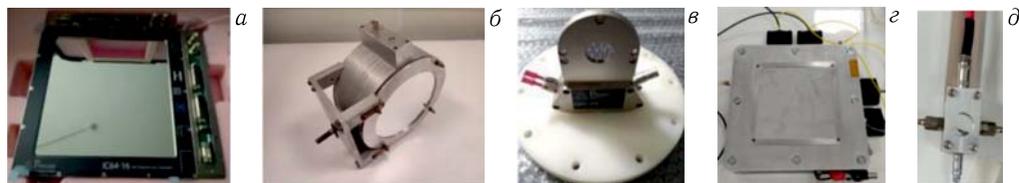


Рис. 5. Детекторы станций: IC64-16 [7] (а), ДК (б), QIC-2S [7] (в), ИК-1 (з) и ИК-3 (д)

На рис. 5, а представлена стриповая ионизационная камера IC64-16 (Pyramid Technical Consultants Inc.) для измерения профиля пучка, плотности пучка во время работы в режиме настройки на СИМБО. Также на СИМБО будет использоваться наклонная дозиметрическая ионизационная камера (ДК) для определения поглощенной дозы (рис. 5, б), для измерения распределения интенсивности пучка ионов в четырех секторах рабочего поля будет использован детектор QIC-2S (Pyramid Technical Consultants Inc.) (рис. 5, в), алмазный детектор (АО «ИФТП», Дубна) служит для измерения средней энергии ионов, тонкий сцинтилляционный счетчик предназначен для измерения нецелевых ионов примеси в пучке на мишени СИМБО. СФ СИМБО предназначен для измерения плотности потока ионов и профилей пучка, система диагностики на основе дозиметрических пленок ЕВТЗ позволит определить пространственное распределение дозы на мишени.

На ИСКРА для измерения плотности потока вторичных ионов будут использоваться две ионизационные камеры — ИК-1 (рис. 5, *з*) и ИК-2, расположенные до и после ослабителя энергии. Для измерения линейных потерь энергии на мишени во время эксперимента на ИСКРА будут использованы миниатюрная газонаполненная ионизационная камера (ИК-3, рис. 5, *д*) и кремниевый детектор. СФ будет применен для измерения плотности потока ионов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Физический пуск оборудования СОЧИ был выполнен в декабре 2021 г. Дальнейшие пусконаладочные работы были продолжены в 2022 г. на пучках ионов аргона. Работы, связанные с монтажом оборудования СИМБО и ИСКРА, были запланированы на конец 2022 – начало 2023 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Syresin E. et al.* New Nuclotron Beam Lines and Stations for Applied Researches // Proc. of the 10th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2019), Melbourne, Australia, May 19–24, 2019. P. 449.
2. *Filatov G. A., Slivin A., Syresin E. M., Butenko A. V., Chesnov A. F., Parfilo T., Tuzikov A. V.* New Beam Lines for Applied Research at the NICA Facility and Their Beam Dynamics // Phys. Part. Nucl. Lett. 2020. V. 17, No. 4. P. 434.
3. *Slivin A. et al.* Commissioning of the SOCHI Applied Station Beam and Beam Transfer Line at the NICA Accelerator Complex // Proc. of the 13th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2022), Bangkok, June 12–17, 2022. P. 3099.
4. *Chumakov A. I., Sogoyan A. V., Yanenko A. V.* Limitations of Methods for Evaluating the Hardness of Microelectronic Devices to Single Event Effects on Ion Accelerators // Russ. Microelectron. 2022. V. 51, No. 1. P. 19.
5. *Filatov G., Slivin A., Syresin E., Butenko A., Vorozhtsov A., Agapov A., Shipulin K., Kolesnikov S., Karpinskii V., Kuznetsov M., Kirov S., Sergeev A., Galimov A., Tikhomirov A., Tyulkin V., Letkin D., Leushin D., Tuzikov A.* Progress on New Beam Lines Design and Construction for Applied Research at NICA // Phys. Part. Nucl. Lett. 2022. V. 19, No. 5. P. 513.
6. *Tuzikov A. V., Butenko A. V., Fateev A. A., Kolesnikov S. Yu., Meshkov I. N., Mikhaylov V. A., Shvetsov V. S., Sidorin A. O., Sidorov A. I., Trubnikov G. V., Volkov V.* Beam Transfer from Heavy-Ion Linear Accelerator HILAC into Booster of NICA Accelerator Complex // Proc. of the 25th Russ. Part. Accel. Conf. (RuPAC'2016), Saint Petersburg, Russia, Nov. 21–25, 2016. P. 443.
7. *Filatov G. A. et al.* Beam Lines and Stations for Applied Research Based on Ion Beams Extracted from Nuclotron // Proc. of the 13th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2022), Bangkok, June 12–17, 2022. P. 3096.
8. *Slivin A. et al.* Description of the Beam Diagnostics Systems for the SOCIT, SODIT and SODIB Applied Research Stations Based on the NICA Accelerator Complex // Proc. of the 12th Intern. Part. Accel. Conf. (IPAC'2021), May 24–28, 2021. P. 946.