

ПРОТОТИП ОБЛУЧАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ПРИКЛАДНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НА ВЫВЕДЕННЫХ ПУЧКАХ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА НУКЛОТРОН

*А. А. Балдин^{а,б}, А. И. Берлев^{а,б}, В. Браднова^а,
А. В. Бутенко^а, И. В. Кудашкин^{а,б,1}, А. Н. Федоров^{а,б}*

^а Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

^б Институт перспективных исследований «Омега», Дубна, Россия

Представлены результаты по созданию и испытанию элементов облучательного стенда для изучения воздействия пучка ускорителя на биологические объекты, изделия электронной техники и других прикладных задач. Созданные системы мониторинга пучков и позиционирования объектов облучения испытаны на выведенных пучках ионов аргона в рамках экспериментов по определению радиационной стойкости изделий электронной техники.

The results of creation and testing of elements of a test bench for investigation of the action of an accelerated particle beam on biological objects, electronics, and other targets are presented. The systems for beam monitoring and target positioning were tested at extracted argon beams in the framework of the experiment on determination of radiation hardness of electronic components.

PACS: 29.20.dk; 29.27.Fh

ВВЕДЕНИЕ

Прикладные исследования справедливо занимают значительное место в физической программе ускорительных комплексов в любом крупном научном центре мира. Такие возможности имеются и реализуются на ускорительном комплексе нуклотрон ЛФВЭ ОИЯИ, а также с использованием бустера ускорительного комплекса NICA [1]. Выведенные пучки нуклотрона представляют уникальные возможности для проведения широкого круга исследований с набором как легких, так и тяжелых ядер в области промежуточных энергий от сотен МэВ/нуклон до нескольких ГэВ/нуклон.

Данная работа посвящена созданию и испытанию прототипов элементов облучательного стенда для прикладных исследований с выведенными пучками нуклотрона с учетом

¹E-mail: kudashkin@jinr.ru

особенностей работы ускорительного комплекса. Рассматриваются два основных направления прикладных исследований:

- радиационные испытания изделий электронной техники (ИЭТ), в том числе для космической промышленности («Роскосмос», завод «Интеграл» (Белоруссия) и другие центры — производители радиационно стойкой электронной техники);
- облучение биологических объектов пучками релятивистских ионов.

Защита от радиационного воздействия как легких элементарных частиц, так и тяжелых ядер становится все более важным фактором в реализации национальных программ для космических исследований, разработки надежной радиационно стойкой электроники летательных аппаратов [2–4]. В рамках данного направления в мире интенсивно проводятся исследования воздействия пучков релятивистских тяжелых ионов на биологические объекты и материалы, в том числе на микросхемы, элементы микросхем, а также на работу электронных модулей в режиме реального времени. Анализ модификации материалов под воздействием релятивистских тяжелых ионов в режиме как однократных попаданий, так и облучения с высокой радиационной дозой представляет приоритетную физическую задачу данного направления [5]. Отметим, что и на ускорительном комплексе ЛФВЭ имеются проблемы с отказами и сбоями электронной аппаратуры, размещенной вблизи кольца ускорителя, под действием радиационного фона. Изучение радиационной стойкости материалов под воздействием высоких доз облучения, в том числе тяжелыми ионами, необходимо для разработки радиационной защиты космических станций, спутников, других летательных аппаратов. Особую актуальность в последнее время приобрели задачи, связанные с изучением разовых отказов в работе больших интегральных микросхем и процессоров при воздействии единичных тяжелых ионов, проходящих через тело микросхемы в заданном месте.

Особое внимание в космических исследованиях уделяется обеспечению радиационной защиты космонавтов [6]. Известно, что даже незначительные дозы тяжелых ионов способны вызвать серьезные необратимые повреждения живых тканей. Тяжелые заряженные частицы (и, в первую очередь, многозарядные ионы) являются эффективным инструментом при решении фундаментальных вопросов, связанных с выяснением механизмов биологического действия ионизирующей радиации. ЛРБ ОИЯИ активно ведет радиобиологические исследования на ускорителях тяжелых ионов [7] — фазотроне ЛЯП, циклотронах ЛЯР, нуклотроне [8]. Планируется расширение таких исследований на пучках ускорительного комплекса ЛФВЭ. К специфическим требованиям к пучкам в рамках данного направления следует отнести создание системы сканирования пучка относительно биологической мишени. Необходимо также создание специфических радиационно-защищенных условий для подготовки и хранения образцов биологических объектов вблизи зоны облучения.

Ключевыми пунктами для проведения рассматриваемых прикладных исследований являются: обеспечение заданного температурного режима в процессе облучения; прецизионное дистанционное перемещение облучаемых образцов относительно пучка и динамическое неразрушающее мониторинговое наблюдение пучка ионов в процессе облучения. Комплекс для проведения прикладных исследований должен включать различные дистанционно управляемые мишенные станции для заданных типов облучаемых объектов (живые объекты и ИЭТ). Кроме того, поскольку некоторые электронные компоненты и изделия необходимо облучать и исследовать в процессе их работы, это накладывает специальные требования к подключению и размещению дополнительного электронного оборудо-

дования (источников питания, шин заземления, компьютеров и т. д.) в зоне пучковых испытаний.

Прикладные исследования предполагают специфические требования к измеряемым и контролируемым характеристикам пучка как со стороны оператора, проводящего измерения (заказчика исследования), так и со стороны оператора ускорителя, обеспечивающего стабильность и контроль заданных параметров пучков (энергий, типов и зарядов ионов, а также возможности получения различных интенсивностей и временных структур пучка). Очевидно, что проведение таких исследований требует не только динамического контроля и визуализации основных параметров выведенных пучков в процессе облучения, но и согласованной с заказчиком паспортизации накопленных данных для последующего анализа.

Простейшие расчеты ионизационных потерь показывают, что для изучения единичных эффектов как в биологических образцах, так и в ИЭТ наиболее подходящий диапазон энергии пучков ионов соответствует интервалу 100–2000 МэВ/нуклон. В данном диапазоне энергии имеется возможность исследования облучаемых образцов вне вакуумной камеры, что также упрощает мониторинг пучков в процессе облучения.

Одной из проблем получения пучков тяжелых ионов низкой интенсивности для изучения единичных эффектов является необходимость разработки специализированных детекторов для надежного измерения и контроля интенсивности пучка не только в месте облучаемого объекта, но и в процессе ускорения и вывода из ускорителя.

С целью развития прикладных исследований на ускорительном комплексе ЛФВЭ в 2011 г. начаты работы по созданию системы диагностики и мониторинга цирку-

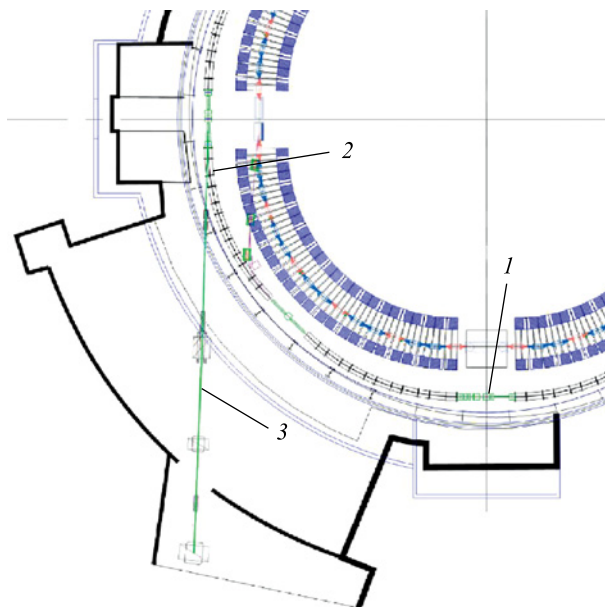


Рис. 1. Расположение систем мониторинга для прикладных исследований на пучках нукло-трона: 1 — место расположения системы диагностики циркулирующего пучка; 2 — место вывода пучка из ускорителя; 3 — фокус Ф-3 в экспериментальном зале

лирующих и выведенных пучков нуклотрона [9, 10]. Испытания прототипов элементов облучательного стенда для прикладных исследований на ускорительном комплексе были проведены в 2013–2014 гг. Измерения, контроль параметров выведенных пучков и пробное облучение образцов проводились на пучках дейтронов, ионов лития, углерода, аргона в диапазоне энергии 500–2000 МэВ/нуклон и широком диапазоне интенсивности от единиц до 10^{10} с⁻¹. Изучена проблема синхронизации работы систем мониторингования циркулирующего и выведенного пучков ускорителя.

На рис. 1 обозначены места расположения систем мониторингования пучка на ускорительном комплексе ЛФВЭ для прикладных исследований. Система диагностики циркулирующего пучка располагается на теплом участке нуклотрона. Ионизационный детектор на основе микроканальных пластин размещен внутри вакуумной камеры ускорителя [9]. Элементы облучательного стенда располагались как в непосредственной близости от места вывода пучка из ускорителя с целью минимизации количества вещества на пути пучка, так и на расстоянии 35 м от места вывода в экспериментальном зале (фокус Ф-3). Для диагностики выведенных пучков в фокусе Ф-3 дополнительно использовалась система мониторингования, созданная в рамках коллаборации «Энергия + трансмутация» [10].

ОПИСАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СТЕНДА

На рис. 2 представлена схема размещения оборудования облучательного стенда в месте вывода пучка из нуклотрона. На рис. 3 показан прототип системы дистанционного позиционирования детекторов и образцов для облучения. Ионизационная камера использовалась для измерения интенсивностей более 10^5 ионов за цикл вывода частиц из ускорителя и калибровалась при помощи тонкого сцинтилляционного детектора при интенсивностях менее 10^6 однозарядных ионов за цикл ускорителя.

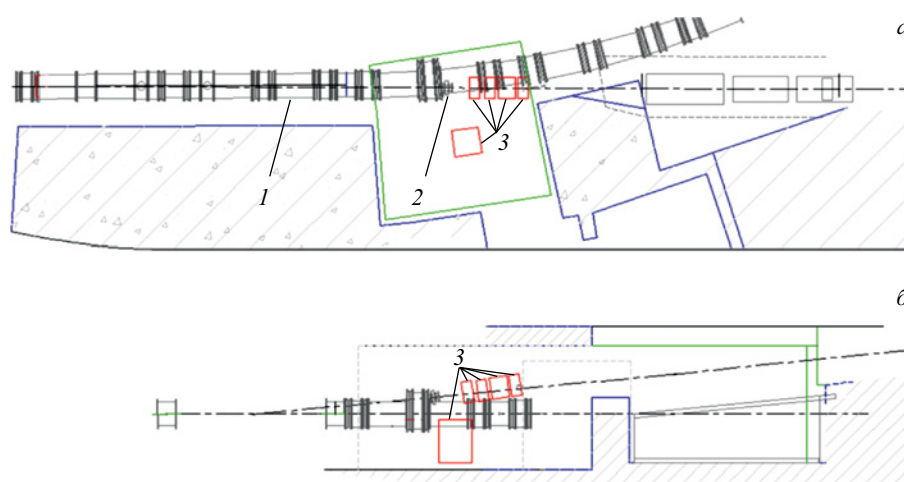


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Схема размещения оборудования облучательного стенда в месте вывода пучка из нуклотрона. *а*) Вид сверху; *б*) вид сбоку. 1 — кольцо нуклотрона; 2 — окно вывода пучка. Красным обозначены элементы и оборудование облучательного стенда (3)

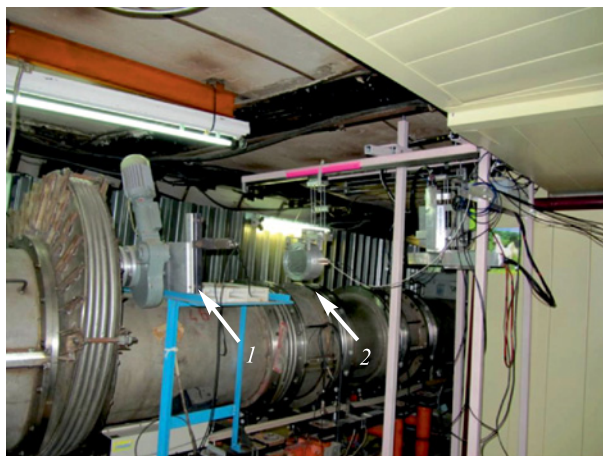


Рис. 3. Прототип системы позиционирования детекторов и образцов для облучения: 1 — окно вывода пучка; 2 — ионизационная камера

Система позиционирования предназначена для перемещения образцов и пучковых детекторов с целью обеспечения однородности облучения заданных областей образца пучком требуемой интенсивности. Под однородностью облучения понимается относительно равное (заранее заданное) число ионов, прошедших через все площади с размерами, например, 1×1 мм для заданной области облучения (размером 200×200 мм). Очевидно, что само понятие «однородность» определяется не только числом ионов, но и гранулярностью площади, на которой рассматривается это понятие. Однородность облучения объекта испытаний пучком ускоренных ядер может быть достигнута как путем перемещения объекта испытаний по заданной траектории в плоскости, перпендикулярной оси пучка, так и с помощью использования специализированных систем развертки пучка на неподвижном объекте. На выведенных пучках нуклотрона с энергиями 500–2000 МэВ/нуклон предпочтительным является метод перемещения образца относительно пучка. Данная методика требует синхронной работы системы динамического позиционирования и системы измерения пространственно-временных характеристик пучка в процессе облучения.

На рис. 4 показана схема расположения четырех дистанционно управляемых станций для ввода/вывода и перемещения пучковых детекторов и образцов для проведения

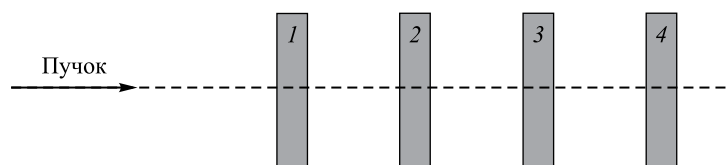


Рис. 4. Схема расположения детекторов и образцов: 1 — станция размещения ядерных фотоэмульсий и ионизационной камеры; 2 — станция тонкого сцинтилляционного детектора и многоканального сцинтилляционного профилометра; 3 — станция образцов для облучения; 4 — станция толстого сцинтилляционного детектора и пропорциональной камеры

испытаний. Ядерные фотоэмульсии использовались для настройки заданных характеристик пучка до облучения образцов. Контроль пространственно-временных характеристик пучка в процессе облучения осуществляется при помощи тонкого сцинтилляционного детектора, многоканального сцинтилляционного профилометра (станция 2), толстого сцинтилляционного детектора и пропорциональной камеры (станция 4). После настройки пучка с требуемыми характеристиками на станции 3 вводится контрольный образец с эмульсией быстрого проявления для подтверждения пространственного положения пучка в месте размещения образца. В случае изучения единичных эффектов (низкие интенсивности пучков до 10^5 с^{-1}) контроль состава пучка осуществляется на основе измерения амплитудных спектров с тонкого и толстого сцинтилляционных детекторов.

Таким образом, в зависимости от постановки задачи используются разные комбинации детекторов с возможностью их дистанционного ввода/вывода.

Система сбора и передачи данных основана на многоканальных блоках интенсивности счета ПИС-32 [9], который обеспечивает регистрацию сигналов со всех детекторов в едином временном формате с задаваемой частотой дискретизации. Используемая электроника позволяет дистанционно управлять порогами дискриминаторов аналоговых сигналов, регистрировать логические сигналы, регулировать временную задержку и параметры выбранного временного окна измерений. Таким образом, для каждого цикла ускорителя записывается и передается по сети Ethernet двумерная матрица отсчетов со всех детекторов, в зависимости от времени их регистрации, с заданным временным шагом (от 100 нс до 40 мс).

С целью минимизации количества вещества на пути пучка перед облучаемым образцом тонкий сцинтилляционный детектор имеет толщину 1,4 мм по пучку. Сцинтилляционный профилометр состоит из 16 сцинтилляционных световодов диаметром 1 мм, расположенных с шагом 3 мм. Таким образом, два профилометра (вертикальный и горизонтальный) перекрывают 48×48 мм площади, перпендикулярной оси пучка. Комбинация этих двух детекторов обеспечивает измерение и контроль общего числа ионов и динамику пространственных характеристик выведенного пучка для интенсивности не более 10^6 с^{-1} . При интенсивности выше 10^6 с^{-1} использовались секционированные ионизационные камеры [10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Проведено независимое контрольное измерение интенсивности и профиля выведенного пучка (ионы Ar^{+18} с энергией 500 МэВ/нуклон) при помощи ядерных фотоэмульсий. На рис. 5, *а* показана проявленная ядерная фотоэмульсия, на рис. 5, *б* — она же под микроскопом с 200-кратным увеличением.

Поскольку эмульсии располагались на станции 3, где размещаются опытные образцы микросхем, данное измерение позволило провести дополнительную калибровку абсолютной интенсивности и профиля выведенного пучка, а также уточнить координатное положение облучаемых образцов. Одновременно проводился контроль стабильности параметров орбиты и интенсивности ускоряемого пучка при помощи детектора на основе микроканальных пластин [9].

На рис. 6 показан динамический профиль циркулирующего пучка ионов аргона от момента инъекции до окончания вывода из ускорителя при энергии 500 МэВ/нуклон. Начиная с момента времени 1300 мс осуществлялся медленный вывод пучка из ускорителя.

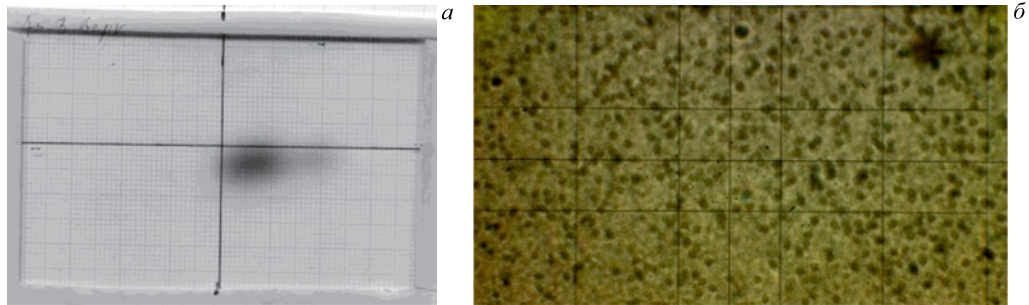


Рис. 5. Проявленная ядерная фотоэмульсия пучка ионов Ar^{+18} с энергией 500 МэВ/нуклон: а) эмульсия на миллиметровой бумаге; б) эмульсия под микроскопом с 200-кратным увеличением

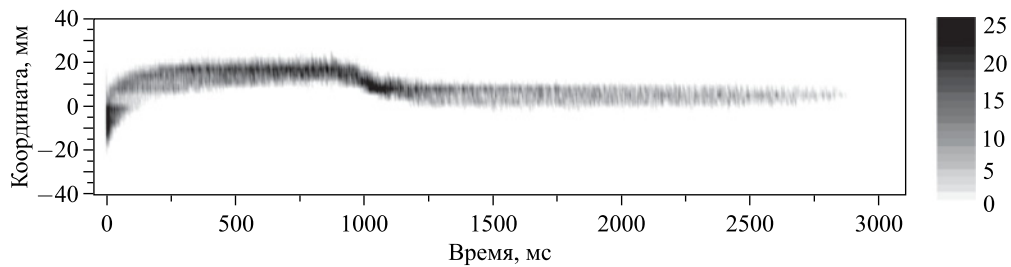


Рис. 6. Динамический профиль циркулирующего пучка ионов аргона от момента инъекции до окончания вывода из ускорителя при энергии 500 МэВ/нуклон

Для данного цикла ускорения на рис. 7 представлен вертикальный динамический профиль выведенного пучка, зарегистрированный на станции 2 при помощи сцинтилляционного профилометра.

Для определения состава выведенного пучка (ионы Ar^{+18} с энергией 500 МэВ/нуклон) производились наборы амплитудных спектров сигналов с толстого и тонкого сцинтилляционных детекторов при помощи четырехканального быстрого АЦП DRS4 [11]. На рис. 8 показан характерный амплитудный спектр сигналов со сцинтилляционного детек-

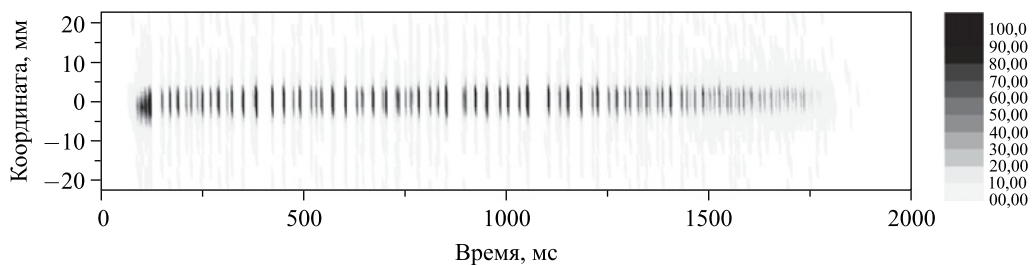


Рис. 7. Вертикальный динамический профиль выведенного пучка ионов Ar^{+18} с энергией 500 МэВ/нуклон, зарегистрированный при помощи сцинтилляционного профилометра

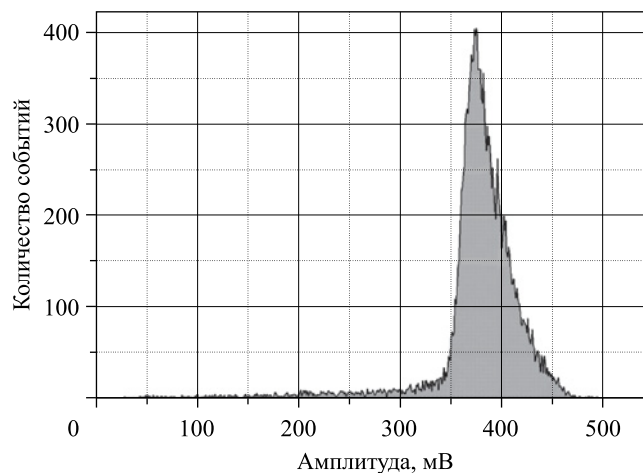


Рис. 8. Амплитудный спектр выведенного пучка ионов Ar^{+18} с энергией 500 МэВ/нуклон, полученный со сцинтилляционного детектора

тора. Основному пику амплитуд от 340 до 480 мВ соответствуют ионы Ar^{+18} . Интегральное количество ионов с меньшим, чем Ar^{+18} , зарядом (ядерные фрагменты) составляло не более 7% в месте расположения исследуемых образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыт создания макета облучательного стенда показал адекватность выбранных решений для облучения образцов с требуемыми параметрами на основе дистанционного позиционирования объектов облучения и детекторных систем мониторинга выведенных пучков. Можно сделать вывод, что система позиционирования и перемещения дает возможность облучать объекты испытаний с однородностью не хуже 10% на площади размером 200×200 мм. При дополнительном использовании коллиматоров имеется возможность создавать тонкие (1×1 мм) пучки, позволяющие прецизионно исследовать заданные области облучаемых образцов.

Дальнейшая разработка программного обеспечения для управления системой позиционирования и перемещения в сочетании с динамическим контролем пространственных характеристик пучка позволит достигнуть однородности облучения с гранулярностью 1×1 мм с точностью не хуже 5%.

Для мониторинга пучков тяжелых ионов перспективным направлением может быть неразрушающий тип диагностики пучка в вакуумной камере на основе микроканальных пластин. Опыт создания и эксплуатации такого детектора на внутреннем циркулирующем пучке нуклотрона показал возможность использования такого детектора и на выведенных пучках тяжелых ионов (с массовым числом более 100), начиная с интенсивности 10^5 с^{-1} . Использование детекторов на микроканальных пластинах позволит свести к минимуму количество вещества на пути пучка перед облучаемым объектом.

Работы по созданию прототипов элементов облучательного стенда, описанные в настоящей статье, выполнены в рамках договора между ОИЯИ и ОАО «ОРКК» на основе

Государственного контракта №752-K547/12 с Федеральным космическим агентством и частично поддержаны грантом РФФИ №14-02-00896.

Авторы выражают свою искреннюю благодарность В. Д. Кекелидзе, Г. В. Трубникову, А. О. Сидорину, В. М. Слепневу, В. И. Волкову, С. В. Романову, С. И. Тютюнникову, А. И. Малахову, П. И. Зарубину, Е. В. Костюхову и сотрудникам службы эксплуатации нуклотрона за помощь в работе и полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kekelidze V. et al.* NICA Project at JINR // Part. Nucl., Lett. 2012. V. 9, No. 4–5(174–175). P. 521–526.
2. *Knoll G.* Radiation Detection and Measurement. New York: John Wiley & Sons, 1989.
3. *Srouf J. R.* Radiation Effects on Microelectronic in Space // Proc. Conf. IEEE. 1988. V. 76. P. 1443–1469.
4. *Верхотуров В. И.* Проблемы обеспечения радиационной стойкости элементов и аппаратуры современных спутников связи // Вопр. атом. науки и техники. Сер. «Физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру». 2004. № 6.
5. *Анашин В. С.* Метод контроля дозовой стойкости элементов телекоммуникационных систем к воздействию ионизирующих излучений космического пространства // Технологии ЭМС. 2007. № 3(27). С. 55–60.
6. *Грачев Н. Н., Мырова Л. О.* Защита человека от опасных излучений. М.: БИНОМ, Лаборатория знаний, 2005. 317 с.
7. *Красавин Е. А. и др.* Генетическое действие излучений с разными физическими характеристиками на клетки человека и млекопитающих // ЭЧАЯ. 2004. Т. 35, вып. 6. С. 1484–1511.
8. *Тимошенко Г. Н., Бамблевский В. П.* Физические аспекты радиобиологических экспериментов на пучках релятивистских ядер нуклотрона. Препринт ОИЯИ Р16-2003-62. Дубна, 2003. 10 с.
9. *Балдин А. А. и др.* Детектор на основе микроканальных пластин для контроля пространственно-временных характеристик циркулирующего пучка нуклотрона // Письма в ЭЧАЯ. 2014. Т. 11, № 2(186). С. 209–218.
10. *Балдин А. А. и др.* Мониторирование выведенных пучков ускорительного комплекса нуклотрон для экспериментов «Энергия + трансмутация» // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13, № 2(200). С. 334–344.
11. *Ritt S.* Design and Performance of the 6 GHz Waveform Digitizing Chip DRS4 // Proc. Conf. IEEE/NSS. Dresden, 2008.

Получено 8 июля 2015 г.