

ЭКОЛОГИЯ
ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ,
МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 621.039.83

**СТАТУС ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ
РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИЙ СТЕНД НА ВЫВЕДЕННОМ ПУЧКЕ ЯДЕР
УГЛЕРОДА ИЗ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА У-70¹**

© 2024 г. Ю. М. Антипов^a, А. Г. Васильева^{a, *}, Д. А. Васильев^a,
В. А. Калинин^a, А. В. Кошелев^a, С. В. Маконин^a, А. В. Максимов^a,
Е. В. Парменова^a, В. А. Пикалов^a, М. К. Полковников^a, А. П. Солдатов^a,
Е. В. Корякина^b, С. Н. Корякин^b, В. О. Сабуров^b, А. Н. Соловьёв^b,
М. В. Трошина^b, А. А. Перевезенцев^c, А. С. Штемберг^c, Н. П. Сирота^d,
Е. Н. Смирнова^d, О. М. Розанова^d, Т. А. Белякова^f

^aИнститут физики высоких энергий имени А. А. Логунова
Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”
Россия, 142281, Протвино, площадь Науки, 1

^bМедицинский радиологический научный центр имени А.Ф. Цыба –
филиал ФГБУ “НМИЦ радиологии”
Россия, 249036, Обнинск, ул. Королева, 4

^cИнститут медико-биологических проблем Российской академии наук
Россия, 123007, Москва, Хорошевское шоссе, 76 А

^dИнститут теоретической и экспериментальной биофизики Российской академии наук
Россия, 142290, Пущино, ул. Институтская, 3

^fФизико-технический центр Физического института им. П.Н. Лебедева Российской
академии наук

Россия, 142280, Протвино, ул. Мира, 1Н

*e-mail: vasilyeva-ag@ihep.ru

Поступила в редакцию 12.12.2023 г.

После доработки 12.04.2024 г.

¹ Материалы 28-й конференции по ускорителям заряженных частиц “RuPAC’23”, Новосибирск.

Принята к публикации 24.04.2024 г.

Представлена информация о текущем состоянии установки радиобиологический стенд (РБС) на выведенном пучке ионов углерода из ускорительного комплекса У-70. Освоен медленный вывод (до 900 мс) пучка ядер углерода из ускорителя У-70 на установку РБС с энергиями 200–450 МэВ/нуклон для радиобиологических и доклинических исследований, направленных на разработку отечественных методик лечения онкологических заболеваний ускоренными ионами углерода. Кратко описаны средства транспортировки пучка в зону РБС, а также средства пассивной и активной модификации пучка. Приведены характеристики пучка, итоги последней модернизации РБС. Представлены результаты радиобиологических исследований, полученных с помощью установки РБС.

1. ВВЕДЕНИЕ

Для проведения радиобиологических и доклинических исследований, направленных на разработку отечественных методик лечения онкологических заболеваний ускоренными ионами углерода, в ИФВЭ была создана экспериментальная установка радиобиологический стенд (РБС). Она работает с 2013 года на выведенном из ускорителя У-70 пучке ионов углерода. В 2017 году установка была оформлена как Центр коллективного пользования, и на данный момент РБС функционирует в каждом сеансе работы ускорителя У-70 на выведенном пучке ионов углерода [1].

Ускоренные ионы углерода с энергиями 200–450 МэВ/нуклон выводятся из ускорителя У-70 в экспериментальный зал методом медленного вывода. Медленный вывод углеродного пучка из ускорителя в медицинский канал осуществляется по схеме, предложенной Пиччони и Райтом в 1954–1955 годах [2–4]. В настоящее время реализован вывод шести фиксированных значений энергии пучка углерода: 450, 400, 350, 300, 250 и 200 МэВ/нуклон. Энергия пучка ионов углерода, его интенсивность и другие параметры соответствуют необходимым требованиям для медицинского применения. Технические характеристики пучка ионов углерода приведены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики пучка ионов углерода

Наименование параметра	Значение
Тип ионов	$^{12}\text{C}^{6+}$
Способ получения ионов	Медленный вывод из ускорителя У-70
Диапазон выводимых энергий ионов углерода, МэВ/нуклон	От 200 до 450 (6 ступеней)
Диапазон пробегов ионов в воде, мм	От 5 до 300
Количество частиц в одном цикле вывода	До $3.0 \cdot 10^9$
Погрешность накопленной дозы в мишени, %	Не более 5

Средства транспортировки пучка в зону РБС, а также некоторые средства пассивной и активной модификации пучка, в том числе изготовленная электромагнитная система формирования равномерного дозового поля на объекте или система сканирования, были представлены ранее [4]. Зона установки РБС имеет биологическую защиту и состоит из двух зон с единой системой контроля доступа: радиобиологической и медицинской. Эти зоны отделены друг от друга бетонной стеной с промежуточным сменным металлическим коллиматором для регулировки размеров пучка. В медицинской зоне установлен 6-координатный стол с системой автоматизированного управления, а также лазерный центратор. В радиобиологической зоне располагается водный фантом с 3D-системой перемещения. Фантом и система управления им полностью разработаны и изготовлены в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ. Основные характеристики водного фантома приведены в табл. 2.

Таблица 2. Основные характеристики водного фантома изготовления НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ

Внешние размеры	590 × 360 × 375 мм ³
Материал стенок	Поликарбонат
Толщина передней и задней стенок (относительно направления пучка)	30 мм
Толщина боковых стенок	15 мм
Внешние размеры кессона	130 × 240 × 265 мм ³
Толщина передней стенки кессона	5 мм
Материал передней стенки кессона	полиметилметакрилат, ПММА
Толщина задней и боковых стенок кессона	15 мм
Материал задней и боковых стенок кессона	Поликарбонат

Внешний вид водного фантома показан на рис. 1.

Рис. 1. Внешний вид водного фантома с 3D-системой перемещения.

Для дозиметрического сопровождения радиобиологических исследований на установке РБС используются термолюминесцентные дозиметры (ТЛД) (типа ДТГ-4, Ангарский филиал ООО “УралПрибор”, Россия и МТТ-7, *RADCARD*, Польша), клинический дозиметр PTW UNIDOS weblin с комплектом ионизационных камер (*PTW Freiburg*, Германия) и клинический дозиметр ДКС АТ5350 (АТОМТЕХ, Республика Беларусь), сертифицированные в России в качестве средств измерения (номера по

Госреестру 37971-08 и 26433-09 соответственно). Для оценки равномерности поля облучения в месте эксперимента используются радиохромные дозиметрические пленки Gafchromic EBT3 (*Ashland*, США).

2. МОДЕРНИЗАЦИЯ РБС

С 2021 года была проведена значительная модернизация установки РБС.

Модифицирована система медленного вывода пучка ядер углерода из ускорителя У-70 на установку РБС. Теперь облучение может проводиться импульсами длительностью до 900 мс по сравнению с режимом медленного вывода длительностью 600 мс, реализованным ранее [3].

Модифицирована электромагнитная система формирования равномерного дозового поля (вобблер-система). Изменены источники питания магнитов: увеличена частота преобразования, за счет чего увеличена скорость изменения тока в обмотках до 75 А/мс. Ведется работа над улучшением стабильности.

Разработан и изготовлен контроллер быстрой остановки вывода пучка по окончании набора дозы в объекте: теперь остановить вывод можно в любой момент цикла вывода, ранее набор дозы происходил с точностью до цикла вывода.

Для точной подстройки энергии пучка до необходимой величины в работу на постоянной основе внедрен пластинчатый дегрейдер, состоящий из шести автоматически вводимых в пучок пластин из полиметилметакрилата (ПММА) разной толщины: 1, 2, 4, 8, 16 и 32 мм. Во время сеанса работы ускорителя в апреле 2023 года впервые было отработано облучение одной дозой заданного объема в воде, согласно разработанному медицинскими физиками плану облучения.

Физический принцип углеродной терапии основан на специфических свойствах тяжелых заряженных частиц (т.е. ядер углерода) образовывать пик Брэгга. Пик Брэгга – это ярко выраженный пик на кривой Брэгга, которая отображает потерю энергии ионизирующего излучения во время его прохождения через вещество. На рис. 2 показаны обычный (а) и модифицированный (б) пики Брэгга при энергии 400 МэВ/нуклон, полученные в весеннем сеансе 2022 года. Для модификации пика Брэгга по глубине используются специально разработанные совместными усилиями сотрудников ИФВЭ и МРНЦ им. А.Ф. Цыба гребенчатые фильтры [5]. Ранее реализованный алюминиевый гребенчатый фильтр с высотой гребня 16 мм для энергии 400 МэВ/нуклон представлен в работе [2]. В дополнение к нему на 3D-принтере из промышленного фотополимера *Industrial Blend (FunToDo, Нидерланды)* сотрудниками МРНЦ им. А.Ф. Цыба были изготовлены два дополнительных гребенчатых фильтра с толщиной гребня 5 мм различной

конфигурации для энергий 400 МэВ/нуклон и 200 МэВ/нуклон. Успешное использование данных фильтров в ходе последнего сеанса на практике подтвердило возможность применения средств трехмерной печати для пассивной модификации кривой Брэгга в пучках ионов углерода.

Рис. 2. Пик Брэгга на энергии 400 МэВ/нуклон: без фильтра (а), с алюминиевым гребенчатым фильтром с высотой гребня 16 мм (б).

Для целей исследований на установке РБС ведется разработка оригинальной методики калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи выведенного пучка ионов углерода активационными детекторами. Для этого конструируется прототип уникальной экспериментальной радиометрической установки. На работающем прототипе данной радиометрической установки уже в течение нескольких сеансов проводится регулярная калибровка плоскопараллельной ионизационной камеры, разработанной и изготовленной ИФВЭ, на энергии 400 МэВ/нуклон. Создание подобной методики и установки для абсолютной калибровки ионизационных камер и датчиков обратной связи в перспективе позволит уменьшить неопределенность в измерении величины поглощенной объемом облучаемой опухоли дозы до не более 5%, что необходимо для медицинского применения.

Также в настоящее время сотрудниками НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ разрабатывается физический модуль системы планирования ионной лучевой терапии. Специалисты МРНЦ им. А.Ф. Цыба работают над биологическим модулем данной системы.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОБИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Совместно со специалистами МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск) в медицинской зоне РБС проводятся доклинические исследования. Коллективно со специалистами ИТЭБ РАН (Пушино), ГНЦ РФ – ИМБП РАН (Москва), а также другими институтами ведутся радиобиологические исследования в радиобиологической зоне. Предварительные результаты подобных исследований были представлены в работах [1, 4, 6, 7].

3.1. МРНЦ им. А.Ф. Цыба

В рамках физико-дозиметрических исследований проводилась верификация модифицированной микродозиметрической модели *in vitro* (МКМ, *Microdosimetric Kinetic Model*). Для этого был сконструирован и изготовлен гребенчатый фильтр, позволяющий создать равномерную с учетом относительной биологической эффективности (ОБЭ) дозу в

расширенном пике Брэгга. Микроцентрифужные пробирки типа Эппендорф ($V = 2$ мл) с суспензией опухолевых (фибросаркома) клеток китайского хомячка В14-150 были установлены на разной глубине области, соответствующей расширенному пику Брэгга, и облучены пучком ионов углерода дозой 2 Гр. В результате различия между значениями выживаемости клеток, полученными экспериментально и спрогнозированными с помощью используемой модели, находились в пределах 3σ [8], что может быть вызвано неопределенностями физического моделирования. Однако в целом результаты авторами признаны положительными, и работа в данном направлении продолжается.

Радиобиологические исследования были проведены как в моноэнергетическом пучке ионов углерода (450 МэВ/нуклон), так и в модифицированном. Для моноэнергетического пучка были получены зависимости доза–эффект в “простреле” (проксимальная область кривой Брэгга) и в пике Брэгга на трех линиях клеток китайского хомячка: нормальных (СНО-К1 (яичник) и V-79 (легкое)) и опухолевых (В14-150). При уровне выживаемости клеток 10% коэффициенты ОБЭ составили 1.3–1.4 в проксимальной области и 4.1–4.2 – в пике Брэгга [9]. В центре модифицированного (расширенного до 30 мм) пика Брэгга (400 МэВ/нуклон) коэффициент ОБЭ для клеток В14-150 оказался существенно ниже: 1.7 [10].

Еще одним направлением являлось исследование эффектов комбинированного воздействия ионами углерода и протонами. Эксперимент проводился также на клетках линии В14-150, которые подвергались облучению в области, соответствующей расширенному пику Брэгга, протонного пучка и пучка ионов углерода в разной последовательности, с различным соотношением доз и временным интервалом. Результаты показали увеличение эффекта при сокращении временного интервала между фракциями, повышении вклада ионов углерода в суммарную дозу и воздействии ионами углерода первой фракцией [10].

3.2. ИТЭБ РАН

Сотрудниками ИТЭБ РАН по тесту 30-суточной выживаемости определены коэффициенты относительной биологической эффективности (ОБЭ) пучка ионов углерода с энергией 450 МэВ/нуклон при облучении мышей пучком ионов углерода дозой 6.5 Гр для разных областей кривой Брэгга. Величина ОБЭ ионов углерода при облучении областей до пика Брэгга составила 0.8, в пике Брэгга шириной 10 и 30 мм – 1.5, после пика Брэгга – 0.7 [11]. При отработке условий облучения и позиционирования животных на РБС было выявлено, что применение ксилазин-золетиловой анестезии снижает гибель животных

после воздействия ионов углерода, а величина модификации дозы значительно зависит от линейной передачи энергии излучения [12].

При исследовании действия наночерия ($n\text{CeO}_2$) при тотальном облучении мышей ионами углерода в средних и летальных дозах с помощью цитогенетического метода и теста 30-дневной выживаемости были обнаружены радиопротекторные и радиомитигаторные свойства $n\text{CeO}_2$. Величина эффектов зависела от доз облучения, времени и способов введения вещества [13].

3.3. ГНЦ РФ – ИМБП РАН

Отделом космической радиобиологии ГНЦ РФ – ИМБП РАН проведено моделирование факторов дальнего космического полета: микрогравитации и галактических космических лучей. В качестве модели последних использован пучок ^{12}C с дозой 0.8 Гр. Благодаря проведенным исследованиям на приматах установлено, что характер нарушения когнитивных функций главным образом зависит от типологических характеристик нервной системы. В частности, животные сангвинического типа наиболее устойчивы к воздействию тяжелых ионов [14]. Исследования на грызунах позволили изучить механизм таких нарушений, опирающийся на сдвиги в метаболизме дофамина [15]. Результаты этих работ имеют ключевое значение при планировании межпланетных полетов.

4. ПЛАНЫ

В настоящее время в НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ в г. Протвино ведутся работы по созданию первого в России экспериментально-клинического центра ионной лучевой терапии (ЭКЦ ИЛТ) на базе действующего Ускорительного комплекса У-70. В рамках этого проекта в экспериментальном зале 1БВ будут построены три лучевых кабины для терапии ускоренными ионами углерода онкологических заболеваний.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На установке РБС было проведено и продолжает проводиться большое количество доклинических и радиобиологических исследований. Разрабатывается методика использования ионов углерода в медицинских целях в ЭКЦ ИЛТ. Модернизация установки РБС дает возможность создавать и отлаживать новое оборудование для управления и диагностики ускоренного пучка ионов углерода с целью улучшения качества и точности облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Pikalov V.A., Antipov Y.M., Zaichkina S.I., Sorokina S.S., Rozanova O.M., Smirnova E.N., Romanchenko S.P., Dyukina O.R., Beketov E.E., Isaeva E.V., Troshina M.V., Lychagin A.A., Solovov A.N., Koryakin S.N., Ulyanenko S.E.* // Proc. RuPAC'18. Protvino: JACoW Publishing. 2018. P. 253.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA50>
2. *Pikalov V.A., Alexeev A.G., Antipov Y.M., Kalinin V.A., Koshelev A.V., Maximov A.V., Ovsienko M.P., Polkovnikov M.K., Soldatov A.P.* // Proc. RuPAC'21. Alushta: JACoW Publishing. 2021. P. 124.
<https://doi.org/10.18429/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06>
3. *Антипов Ю.М., Бритвич Г.И., Иванов С.В., Калинин В.И., Лебедев О.П., Людмирский Э.А., Максимов А.В., Минченко А.В., Солдатов А.П., Хитев Г.В.* // ПТЭ. 2021. № 3. С. 5.
<https://doi.org/10.31857/S0032816221020117>
4. *Антипов Ю.М., Бритвич Г.И., Иванов С.В., Костин М.Ю., Лебедев О.П., Людмирский Э.А., Максимов А.В., Пикалов В.А., Солдатов А.П., Хитев Г.В., Ульяненко С.Е., Лычагин А.А., Исаева Е.В., Бекетов Е.Е., Трошина М.В.* // ПТЭ. 2015. № 4. С. 107.
<https://doi.org/10.7868/S0032816215040011>
5. *Соловьев А.Н., Чернуха А.Е., Трошина М.В., Лычагин А.А., Пикалов В.А., Харлов В.И., Ульяненко С.Е.* // Медицинская физика. 2016. № 4. С. 47.
6. *Бекетов Е.Е., Исаева Е.В., Трошина М.В., Лычагин А.А., Соловьев А.Н., Корякин С.Н., Ульяненко С.Е., Малахов Е.П., Ульяненко Л.Н., Костин М.Ю., Пикалов В.А., Антипов Ю.М., Солдатов А.П.* // Радиационная биология. Радиозэкология. 2017. № 5. С. 462.
<https://doi.org/10.7868/S0869803117050022>
7. *Ульяненко С.Е., Лычагин А.А., Корякин С.Н., Солдатов А.П., Антипов Ю.М., Костылев Д.В.* // Медицинская физика. 2016. № 1. С. 29.
8. *Solovov A., Troshina M., Saburov V., Chernukha A., Moiseev A., Koryakina E., Potetnya V., Koryakin S., Pikalov V., Soldatov A., Kaprin A.* // Biomedical Physics and Engineering Express. 2022. V. 8. С. 035030.
<https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac414f>
9. *Корякина Е.В., Потетня В.И., Трошина М.В., Ефимова М.Н., Байкузина Р.М., Корякин С.Н., Лычагин А.А., Пикалов В.А., Ульяненко С.Е.* // Радиация и риск. 2019. № 3. С. 96.
<https://doi.org/10.21870/0131-3878-2019-28-3-96-106>
10. *Трошина М.В., Корякина Е.В., Потетня В.И., Соловьев А.Н., Сабуров В.О., Лычагин А.А., Иванов С.А., Каприн А.Д., Корякин С.Н.* // Бюллетень экспериментальной биологии и медицины. 2023. № 7. С. 49.

<https://doi.org/10.47056/0365-9615-2023-176-7-49-52>

11. Заичкина С.И., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Дюкина А.Р., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С., Сорокина С.С., Пикалов В.А. // Биофизика. 2019. № 6. С. 1208.

<https://doi.org/10.1134/S0006302919060206>

12. Балакин В.Е., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С. // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни. 2022. № 1. С. 343.

<https://doi.org/10.31857/S2686738922050043>

13. Балакин В.Е., Розанова О.М., Смирнова Е.Н., Белякова Т.А., Стрельникова Н.С., Смирнов А.В., Васильева А.Г. // Доклады Российской академии наук. Науки о жизни. 2022. № 1. С. 504.

<https://doi.org/10.31857/S2686738922060038>

14. Belyaeva A.G., Kudrin V.S., Nosovsky A.N., Perevezentsev A.A., Shtemberg A.S., Koshlan I.V., Koshlan N.A., Isakova M.D., Bogdanova Y.V., Timoshenko G.N., Krasavin E.A., Blokhina T.M., Yashkina E.I., Osipov A.N. // Life Sciences in Space Research. 2021. V. 30. P. 45.

<https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.05.004>

15. Перевезенцев А.А., Лебедева-Георгиевская К.Б., Кузнецова О.С., Кудрин В.С., Пикалов В.А., Штемберг А.С. // Российский физиологический журнал им. И.М. Сеченова. 2023. № 3. С. 348.

<https://doi.org/10.31857/S086981392303007X>

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Внешний вид водного фантома с 3D-системой перемещения.

Рис. 2. Пик Брэгга на энергии 400 МэВ/нуклон: без фильтра (**а**), с алюминиевым гребенчатым фильтром с высотой гребня 16 мм (**б**).



Рис. 1

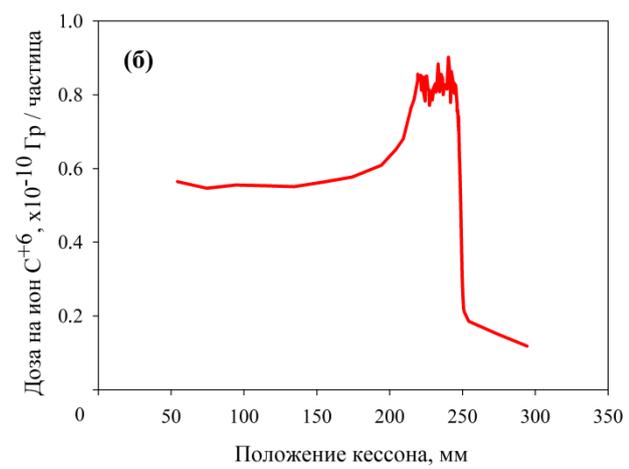
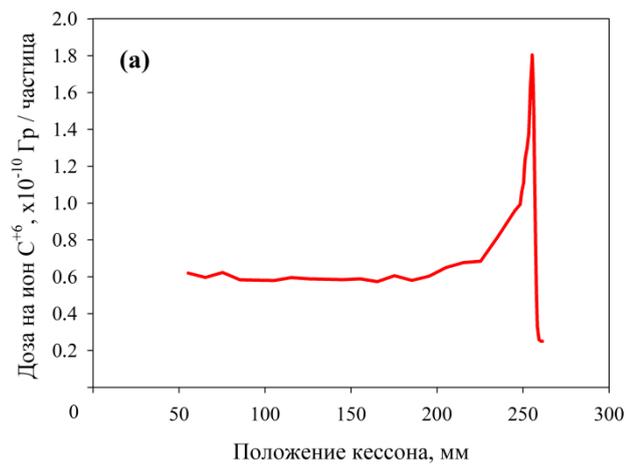


Рис. 2

Для связи с авторами:

Васильева Алина

+7 (903) 500-7313

vasilyeva-ag@ihep.ru

Антипов Юрий

Yuri.Antipov@ihep.ru

Васильев Дмитрий

Dmitry.Vasiliev@ihep.ru

Для переводчика:

**STATUS OF THE EXPERIMENTAL SET-UP RADIOBIOLOGICAL STAND (RBS) ON
EXTRACTED FROM THE U-70 ACCELERATOR COMPLEX BEAM OF CARBON
NUCLEI**

Yu. M. Antipov, A. G. Vasilyeva, D. A. Vasiliev, V. A. Kalinin, A. V. Koshelev, S. V. Makonin,
A. V. Maximov, E. V. Parmenova, V. A. Pikalov, M. K. Polkovnikov, A. P. Soldatov,
E. V. Koryakina, S. N. Koryakin, V. O. Saburov, A. N. Solovev, M. V. Troshina,
A. A. Perevezentsev, A. S. Shtemberg, N. P. Sirota, E. N. Smirnova, O. M. Rozanova, T. A.
Belyakova

The article provides information on the current state of the RBS set-up on the extracted from the U-70 accelerator complex beam of carbon ions. Slow extraction (up to 900 ms) of a beam of carbon nuclei from the U-70 accelerator to the RBS installation with energies of 200–450 MeV/nucleon has been mastered for radiobiological and preclinical research aimed at developing domestic methods for treating oncological diseases with accelerated carbon ions. The equipment of transporting the beam to the RBS zone, as well as the devices of passive and active modification of the beam are briefly described, the characteristics of the beam are given, and the results of the latest modernization of the RBS are presented. The results of radiobiological studies obtained using the RBS set-up are also presented.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pikalov V.A., Antipov Y.M., Zaichkina S.I., Sorokina S.S., Rozanova O.M., Smirnova E.N., Romanchenko S.P., Dyukina O.R., Beketov E.E., Isaeva E.V., Troshina M.V., Lychagin A.A., Solovev A.N., Koryakin S.N., Ulyanenko S.E. // Proc. RuPAC'18. Protvino: JACoW Publishing. 2018. P. 253.
<https://doi.org/10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA50>
2. Pikalov V.A., Alexeev A.G., Antipov Y.M., Kalinin V.A., Koshelev A.V., Maximov A.V., Ovsienko M.P., Polkovnikov M.K., Soldatov A.P. // Proc. RuPAC'21. Alushta: JACoW Publishing. 2021. P. 124.
<https://doi.org/10.18429/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06>
8. Solovev A., Troshina M., Saburov V., Chernukha A., Moiseev A., Koryakina E., Potetnya V., Koryakin S., Pikalov V., Soldatov A., Kaprin A. // Biomedical Physics and Engineering Express. 2022. V. 8. C. 035030.
<https://doi.org/10.1088/2057-1976/ac414f>
14. Belyaeva A.G., Kudrin V.S., Nosovsky A.N., Perevezentsev A.A., Shtemberg A.S., Koshlan I.V., Koshlan N.A., Isakova M.D., Bogdanova Y.V., Timoshenko G.N., Krasavin E.A., Blokhina T.M., Yashkina E.I., Osipov A.N. // Life Sciences in Space Research. 2021. V. 30. P. 45.
<https://doi.org/10.1016/j.lssr.2021.05.004>