

УДК 616-71/-78

РАСПРЕДЕЛЕННЫЙ ЦЕНТР ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ НИЦ “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”: ИСТОРИЯ, СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2022 г. М. В. Ковальчук¹, О. С. Нарайкин¹, К. А. Сергунова¹, Ю. А. Дьякова¹, А. Н. Черных^{1,*},
Р. А. Алиев¹, В. И. Максимов², С. В. Иванов³, Н. Е. Тюрин³, А. П. Солдатов³, Г. И. Кленов¹,
В. С. Хорошков¹

¹Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

²Петербургский институт ядерной физики Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,
Гатчина, Россия

³Институт физики высоких энергий Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,
Протвино, Россия

*E-mail: Chernykh_AN@nrcki.ru

Поступила в редакцию 18.04.2022 г.

После доработки 18.04.2022 г.

Принята к публикации 21.04.2022 г.

Высокотехнологичное оборудование на основе ядерно-физических методов является неотъемлемой частью современной онкологической службы. Комплексный подход к развитию ядерной медицины и лучевой терапии в российской системе здравоохранения позволит не только увеличить доступность ядерных и ускорительных технологий для нашей страны, но и повысить их эффективность и безопасность. Настоящий обзор посвящен роли НИЦ “Курчатовский институт” в развитии ядерно-физических методов, применяемых в медицине, а также новым возможностям и перспективам, открывающимся в результате создания Научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины НИЦ “Курчатовский институт”. Подробно рассмотрены состав и основные технические характеристики пяти разрабатываемых комплексов медицинской радиологии, включая комплекс по наработке радионуклидов и четыре комплекса адронной лучевой терапии.

DOI: 10.31857/S0023476122050113

ОГЛАВЛЕНИЕ

- Введение
1. Медицинская радиология в России
 2. Курчатовский комплекс ядерно-физических установок
 - 2.1. Реакторный комплекс
 - 2.2. Ускорительный комплекс
 - 2.3. Генераторы радионуклидов
 - 2.4. Производство и контроль качества радиофармацевтических лекарственных препаратов
 3. Установки Курчатовского научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины
 - 3.1. Комплекс по наработке радионуклидов на базе циклотрона Ц-80
 - 3.2. Комплекс протонной лучевой терапии
 - 3.3. Онкоофтальмологический комплекс протонной лучевой терапии на базе циклотрона Ц-80
 - 3.4. Экспериментально-клинический комплекс ионной лучевой терапии на базе действующего ускорительного комплекса У-70

3.5. Прототип типового комплекса ионной лучевой терапии

4. Реализация кластерного подхода в области ядерной медицины на базе научно-технологической инфраструктуры НИЦ “Курчатовский институт”

Заключение

ВВЕДЕНИЕ

Современную систему здравоохранения сложно представить без высокотехнологичного оборудования на основе генерирующих источников ионизирующего излучения (гамма-, электронного, протонного, ионного излучения и т.п.), а также ядерных технологий с использованием радионуклидов, в том числе применяемых при создании радиофармацевтических лекарственных препаратов (РФЛП) (рис. 1).

Представленные ядерно-физические методы, лежащие в основе и относящиеся к области медицинской радиологии, нашли широкое применение в диагностике и лечении не только злокаче-



Рис. 1. Ядерно-физические методы, применяемые в медицине.

ственных новообразований, но и сердечно-сосудистых, неврологических, эндокринологических и онкофтальмологических заболеваний.

Текущее направление развития современной радиологии связано не только с усовершенствованием технологий ранней диагностики заболеваний, позволяющих своевременно и правильно определять дальнейший объем лечения, но и с внедрением современных методов лечения, включая комбинированную таргетную терапию, адронную терапию, тераностику, способствующих повышению качества и увеличению продолжительности жизни, что является одной из стратегических целей, определенных Указом Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474.

Однако в отличие от международной лечебной практики отечественная медицина до сих пор испытывает дефицит современных мощностей для лечения злокачественных новообразований, которые наряду с сердечно-сосудистыми заболеваниями занимают ведущее место среди причин смерти во всем мире, в том числе в России. По данным Росстата в 2020 г. от болезней систем кровообращения умерли 938.5 тыс. человек (43.9%) и от злокачественных новообразований — 295.9 тыс. человек (13.8%) [1].

1. МЕДИЦИНСКАЯ РАДИОЛОГИЯ В РОССИИ

Сегодня в России в области медицинской радиологии активно применяются методы с использованием рентгеновского, электронного и

гамма-излучения, что обусловлено в первую очередь наличием значительного парка соответствующего оборудования, включающего в себя рентгеновские аппараты, линейные ускорители, гамма-ножи и кобальтовые установки.

В последние годы в мировой практике широкое развитие получили методы адронной терапии с использованием ускоренных пучков протонов (протонная лучевая терапия (ПЛТ)) и тяжелых ионов углерода (ионная лучевая терапия (ИЛТ)), а также относительно новый подход в области персонализированной медицины (тераностика).

В основе тераностики лежит адресная (таргетная) доставка РФЛП, которые являются одновременно и средством ранней диагностики, и терапевтическим агентом, избирательно связывающимся с определенной мишенью. Это позволяет не только осуществлять направленное воздействие, но и контролировать эффективность лечения.

Преимущество методов ПЛТ и ИЛТ заключается в способности максимально точно локализовать лучевое воздействие в области заданного объема за счет реализации эффекта пика Брэгга, что значительно снижает частоту и выраженность радиоиндуцированных реакций по сравнению с фотонной терапией. Кроме того, одним из основных достоинств ИЛТ является высокая эффективность воздействия на радиорезистивные (радиоустойчивые) опухоли.

В настоящее время в мире насчитывается порядка 100 центров ПЛТ, сосредоточенных в основном в США, Японии, Европе и Китае, а также четыре центра низкоэнергетической протонной



Рис. 2. Научно-образовательный медицинский центр ядерной медицины Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”.

терапии для лечения заболеваний глаз. Кроме того, в Японии, Европе и Китае базируется 13 установок ИЛТ.

В России сегодня функционируют лишь три современных центра ПЛТ в Санкт-Петербурге, Димитровграде и Обнинске, два из которых оснащены циклотронами зарубежного производства. Последний оборудован отечественным комплексом ПЛТ “Прометеус”, предусматривающим облучение только опухолей головного мозга, головы и шеи [2]. Отечественная промышленность ПЛТ серийно не производит.

Кроме того, российское здравоохранение использует крайне ограниченный спектр РФЛП, применяемых в ядерной медицине – не более 15 радионуклидов, на основе которых зарегистрировано 53 РФЛП, в то время как в лечебной практике используются более 100 радиоизотопов.

Решение задач развития ядерной медицины предусмотрено мероприятиями Федеральной научно-технической программы (ФНТП) развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019–2027 гг., утвержденной постановлением Правительства Российской Федерации от 16 марта 2020 г. № 287. Программой предусмотрено создание пяти комплексов медицинской радиологии, входящих в состав будущего Научно-образовательного медицинского центра ядерной медицины (НОМЦ ЯМ) Национального исследовательского центра “Курчатовский институт” (НИЦ “Курчатовский институт”), а именно (рис. 2):

- распределенный комплекс по наработке радионуклидов и синтезу РФЛП;
- комплекс протонной лучевой терапии (ПЛТ);
- онкоофтальмологический комплекс ПЛТ;
- экспериментально-клинический комплекс ионной лучевой терапии (ЭКК ИЛТ) на действующем ускорительном комплексе У-70;
- прототип типового комплекса ИЛТ для типового клинического центра ионной (углеродной) лучевой терапии.

Создание НОМЦ ЯМ на базе НИЦ “Курчатовский институт” позволит решить не только обозначенные выше задачи, но и обеспечить развитие современных ядерных центров в других субъектах Российской Федерации при организационно-методической поддержке НИЦ “Курчатовский институт”.

2. КУРЧАТОВСКИЙ КОМПЛЕКС ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Отметим, что родоначальником развития перспективных и многообещающих ядерно-физических методов в нашей стране стал НИЦ “Курчатовский институт” (рис. 3). Первые технологии, положившие основу современной отечественной ядерной медицины и адронной терапии, появились практически сразу после назначения 10 марта 1943 г. Игоря Васильевича Курчатова научным руководителем работ по использованию атомной энергии в СССР и создания им Лаборатории № 2 АН СССР, в дальнейшем переименованной в НИЦ “Курчатовский институт”. Прежде всего

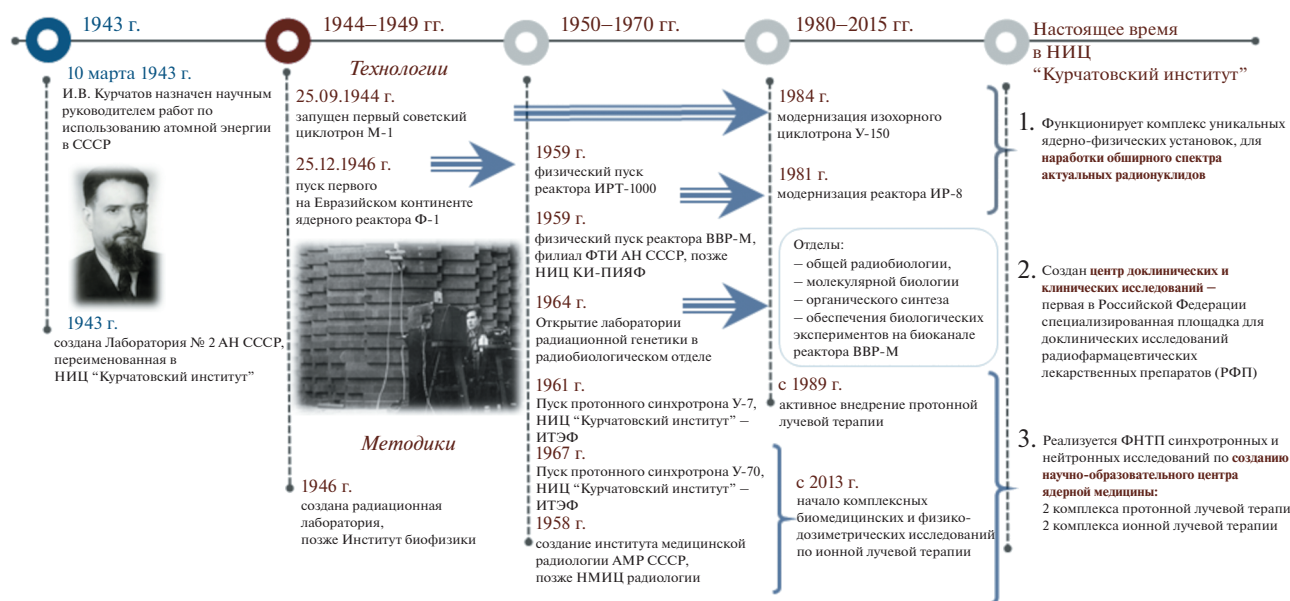


Рис. 3. Хронология развития ядерной медицины и адронной терапии в НИЦ "Курчатовский институт".

это первый советский циклотрон М-1, запущенный в 1944 г., а также первый на Евразийском континенте ядерный реактор Ф-1, пуск которого состоялся 25 декабря 1946 г. Именно они стали прародителями современных отечественных циклотронных и реакторных комплексов сегодняшнего НИЦ "Курчатовский институт".

Кроме того, в послевоенный период в связи с новыми задачами по использованию атомной энергии в мирных целях основными направлениями стало изучение патогенеза, клиники, профилактики и лечения лучевой болезни, разработка методов применения радиоактивных изотопов и других видов ионизирующих излучений для диагностики и лечения. Для изучения влияния радиации на человека и разработки средств защиты в 1946 г. по инициативе И.В. Курчатова в системе Академии наук СССР была создана радиационная лаборатория, позже переименованная в Институт биофизики, которому было поручено изучение биологического действия радиации. Это направление в дальнейшем было продолжено в радиобиологическом отделе филиала Физико-технического института им. А.Ф. Иоффе АН СССР в Гатчине, позднее преобразованного в НИЦ "Курчатовский институт" – ПИЯФ, где в 1964 г. была открыта лаборатория радиационной генетики, а позже общей радиобиологии, молекулярной биологии, органического синтеза. Особое внимание уделялось обеспечению биологических экспериментов на биоканале реактора ВВР-М, запущенного в том же институте в 1959 г. Именно такой междисциплинарный подход и слаженная работа ученых и инженерных кадров позволили руководителю отдела молекулярной биологии

С.Е. Бреслеру создать новое направление и специальность "биофизика". Сегодня на базе этого отдела создан и достаточно успешно функционирует центр доклинических и клинических исследований Курчатовского института, который стал первой в Российской Федерации специализированной площадкой для доклинических исследований РФЛП.

Третьим направлением, в развитии которого важную роль сыграл атомный проект, стала адронная терапия. Запущенные в 60–70-е годы в Институте теоретической и экспериментальной физики (ИТЭФ), Институте физики высоких энергий (ИФВЭ) и Петербургском институте ядерной физики (ПИЯФ) протонные синхротроны У-7 и У-70 и синхроциклотрон СЦ-1000 послужили толчком для начала комплексных биомедицинских и физико-дозиметрических исследований в области протонной и ионной терапии, а также внедрения их в клиническую практику. Сегодня в России НИЦ "Курчатовский институт" обладает самым большим опытом в области адронной терапии: с 1969 г. совместно с семью крупнейшими клиниками Москвы и Санкт-Петербурга было пролечено более 5000 пациентов, что составляет около 80% от российского клинического опыта [3, 4].

Безусловно, основой для создания технологий адронной терапии нового поколения, а также разработки новых технологий наработки перспективных радионуклидов является технологическая база.

Как правило, для производства радиоактивных изотопов медицинского назначения исполь-

зуются стабильные изотопы-мишени. Например, реакторные изотопы ^{98}Mo – ^{99}Mo , ^{176}Yb – ^{177}Lu или циклотронные ^{124}Xe – ^{123}I . Практически все технологии разделения стабильных изотопов были разработаны в Курчатовском институте. В настоящее время НИЦ “Курчатовский институт” имеет два электромагнитных сепаратора, основным продуктом которых является изотоп Иттербия-176, каскад газовых центрифуг для производства изотопов ксенона и фотохимическую установку для производства изотопов ртути. Сегодня на базе НИЦ “Курчатовский институт” создан и функционирует комплекс уникальных ядерно-физических установок, включающий в себя три реакторных комплекса (ИР-8, АРГУС и ПИК) и ряд ускорительных комплексов (СЦ-1000, Ц-80, У-150, У-70, Siemens Eclipse), позволяющих нарабатывать обширный спектр актуальных радионуклидов. Уже сегодня в НИЦ “Курчатовский институт” реализуется производство РФЛП на базе изотопа ^{18}F , осуществляется поставка ^{123}I в медицинские организации. Кроме того, в Курчатовском институте осуществляется наработка целого ряда наиболее перспективных терапевтических радионуклидов – это ^{67}Cu , ^{47}Sc , ^{177}Lu , ^{212}Pb , ^{225}Ac , ^{213}Bi , ^{149}Tb , ^{155}Tb , ^{161}Tb , ^{186}Re , ^{230}U и другие (табл. 1) [5, 6].

2.1. Реакторный комплекс

Ядерным реакторам НИЦ “Курчатовский институт” всегда отводилась значимая роль, связанная не только с наработкой радиоактивных изотопов, в том числе применяемых для медицинских целей, но и отработкой и усовершенствованием технологий их получения.

На реакторах проводилась наработка ^{198}Au и ^{51}Cr для последующего производства РФЛП на заводе “Медрадиопрепарат”, а также нарабатывался широкий спектр других радионуклидов медицинского назначения. В 1980-х годах на основе стабильного изотопа ^{98}Mo , полученного центрифужным методом, в Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова была разработана и внедрена в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского АН СССР технология производства ^{99}Mo и генератора $^{99\text{m}}\text{Tc}$ большой активности. Пертехнетат натрия, производившийся по этой технологии, поступал в большинство московских отделений радионуклидной диагностики. Сегодня РФЛП, меченные $^{99\text{m}}\text{Tc}$, применяются примерно в 80% всех диагностических процедур однофотонной эмиссионной компьютерной томографии. Поэтому разработка новых эффективных методов получения технеция-99m с использованием реакторов и циклотронов является важной задачей в области ядерной медицины.

С помощью ядерного реактора ИР-8 налажено производство радионуклидов для медицинского применения ^{152}Eu , ^{198}Au , ^{127}Xe , $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{191}Os , ^{186}Re , ^{197}Hg , ^{153}Sm , ^{51}Cr .

Сегодня реактор ИР-8 имеет 12 горизонтальных экспериментальных каналов для вывода нейтронных пучков и 29 вертикальных каналов в активной зоне и отражателе. Максимальная плотность потока тепловых нейтронов в экспериментальном канале активной зоны $\sim 1.5 \times 10^{14} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$, отражателя $\sim 2.0 \times 10^{14} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$. Максимальная плотность потока быстрых нейтронов ($E \geq 0.5 \text{ МэВ}$) в экспериментальном канале активной зоны $\sim 1.1 \times 10^{14} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$, отражателя $\sim 4.8 \times 10^{13} \text{ c}^{-1} \text{ см}^{-2}$.

Наиболее перспективной представляется наработка лютеция-177 (^{177}Lu). Этот изотоп является одним из наиболее востребованных терапевтических бета-излучающих радионуклидов для терапии рака, обладает удобным периодом полураспада ($T_{1/2} = 6.71 \text{ сут}$), приемлемой энергией β -частиц ($E_{\text{макс}} = 0.497 \text{ МэВ}$), мягким сопутствующим γ -излучением ($E_{\gamma} = 113 \text{ кэВ}$ (6.4%) и 208 кэВ (11%)). Небольшая длина пробега β -частицы ^{177}Lu в биологических тканях (1–3 мм) обеспечивает избирательное уничтожение опухоли при минимальном повреждении окружающих тканей.

В результате совместной работы сотрудников НИЦ “Курчатовский институт”, Института биологической химии им. академиком М.М. Шемякина и Ю.А. Овчинникова РАН и ООО “Технологии медицинских полимеров” были созданы два РФЛП на основе искусственного адресного полипептида ZHER2, специфичного к опухолевому маркеру HER2/neu, и радиоизотопов ^{177}Lu (ZHER2-ЧСА-хелатор- ^{177}Lu) и ^{212}Pb (ZHER2-ЧСА-хелатор-212Pb).

Помимо ^{177}Lu на ИР-8 можно нарабатывать такие радионуклиды, как ^{161}Tb , ^{67}Cu и многие другие.

В НИЦ “Курчатовский институт” ведутся разработки малоотходных технологий производства осколочных радионуклидов медицинского назначения в растворных реакторах. Для проведения указанных работ имеется необходимая экспериментальная база – исследовательский растворный мини-реактор “Аргус” тепловой мощностью 20 кВт, успешно эксплуатируемый с 1981 г., радиохимическое оборудование и специализированные помещения для работы с радионуклидами.

Агрегатное состояние топлива – водного раствора уранилсульфата UO_2SO_4 – открывает уникальную возможность селективно отбирать целевые радиоизотопы ^{89}Sr , ^{99}Mo , ^{131}I , ^{133}Xe из топливного раствора, не затрагивая ни ^{235}U , ни основную группу осколочных элементов. Это

Таблица 1. Примеры технологий наработки перспективных радионуклидов, разрабатываемых и внедренных на базе НИЦ “Курчатовский институт”

Радионуклид	Период полураспада $T_{1/2}$		Назначение	Тип распада	Уравнение реакции	Технология получения	Литература
	Значение	Размерность					
Диагностические радионуклиды							
^{18}F	110	мин	ПЭТ	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{18}\text{O}(p, n) ^{18}\text{F}$	Ц	
^{68}Ga генератор $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$	68.3	мин	ПЭТ	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{69}\text{Ga}(p, 2n) ^{68}\text{Ge} \rightarrow ^{68}\text{Ga}$	Ц, Г	
^{82}Rb генератор $^{82}\text{Sr}/^{82}\text{Rb}$	1.3	мин	ПЭТ	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{\text{nat}}\text{Rb}(p, x) ^{82}\text{Sr} \rightarrow ^{82}\text{Rb}$	Ц, Г	
^{89}Zr	78.4	час	ПЭТ, оже-терапия	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{89}\text{Y}(d, 2n) ^{89}\text{Zr}$	Ц	[1]
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.05	час	ОФЭКТ	IT (99.9%) $\beta - (0.003\%)$	$^{100}\text{Mo}(p, 2n) ^{99\text{m}}\text{Tc}$	Ц	
^{123}I	13.3	час	ОФЭКТ	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{124}\text{Xe}(p, 2n) ^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$ $^{124}\text{Xe}(p, pn) ^{123}\text{Xe} \rightarrow ^{123}\text{I}$	Ц	
^{132}La	4.8	час	ПЭТ, оже-терапия	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{\text{nat}}\text{Ba}(\alpha, x) ^{132}\text{La}$	Ц	
^{135}La	19.5	час	ПЭТ, оже-терапия	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{\text{nat}}\text{Ba}(\alpha, x) ^{135}\text{La}$	Ц	
^{149}Tb	4.118	час	ПЭТ, α -терапия,	$\epsilon\beta + (83.3\%)$ $\alpha (16.7\%)$	$^{151}\text{Eu}(^3\text{He}, 5n) ^{149}\text{Tb}$	Ц	[2, 3]
^{152}Tb	17.5	час	ПЭТ, оже-терапия	$\epsilon + \beta + (100\%)$	$^{151}\text{Eu}(\alpha, 4n) ^{152}\text{Tb}$	Ц	[4]
^{155}Tb	5.32	день	ОФЭКТ, оже-терапия	ϵ	$^{\text{nat}}\text{Gd}(\alpha, x) ^{155}\text{Dy} \rightarrow ^{155}\text{Tb}$	Ц	[5]
^{201}Tl	3.04	день	ОФЭКТ	ϵ	$^{203}\text{Tl}(p, 3n) ^{201}\text{Pb} \rightarrow ^{201}\text{Tl}$	Ц	
^{203}Pb	2.16	день	Сцинтиграфия	ϵ	$^{\text{nat}}\text{Tl}(p, x) ^{203}\text{Pb}$	Ц	
Терапевтические радионуклиды							
^{103}Ru	39.26	день	Бета-терапия	β	$^{100}\text{Th}(^4\text{He}, x) ^{103}\text{Ru}$	Ц	
^{119}Sb	38.19	час	Оже-терапия	ϵ	$^{\text{nat}}\text{Sn}(\alpha, x) ^{119}\text{Te}(16.03 \text{ ч}) ^{119}\text{Sb}$	Ц	
^{131}I	8	день	Бета-радиотерапия (тераностика)	$\beta -$	$^{130}\text{Te}(n, \gamma) ^{131}\text{Te} \rightarrow ^{131}\text{I}$ $^{235}\text{U}(n, f) ^{131}\text{I}$	Р	
^{161}Tb	6.89	день	Бета-радиотерапия	$\beta -$	$^{160}\text{Gd}(n, \gamma) ^{161}\text{Gd}$ (3.66 мин) $\rightarrow ^{161}\text{Tb}$	Р	
^{161}Ho	2.48	час	Оже-терапия	ϵ	$^{\text{nat}}\text{Dy}(\alpha, x) ^{161}\text{Er} \rightarrow ^{161}\text{Ho}$	Ц	
^{167}Tm	9.25	день	Оже-терапия	ϵ	$^{\text{nat}}\text{Er}(\alpha, 2n) ^{167}\text{Yb}(17.5 \text{ мин})$ $^{167}\text{Tm} ^{165}\text{Ho}(\alpha, 2n) ^{167}\text{Tm}$	Ц	[9, 10]
^{165}Er	10.36	час	Оже-терапия	ϵ	$^{165}\text{Ho}(\alpha, 4n) ^{165}\text{Tm}$ (30.06 ч) $\rightarrow ^{165}\text{Er}(10.36 \text{ ч})$	Ц	
^{177}Lu	6.6443	дн	β -терапия	$\beta -$	$^{176}\text{Yb}(n, \gamma) ^{177}\text{Yb}\beta \rightarrow ^{177}\text{Lu}$	Р Р	
^{186}Re	3.7183	день	Бета-радиотерапия, тераностика	$\beta - (7.47\%)$ $\epsilon (92.53\%)$	$^{186}\text{W}(d, 2n) ^{186}\text{Re}$	Ц	[6–8]
^{188}Re	3.7183	день	Бета-радиотерапия (тераностика)	$\beta - (7.47\%)$ $\epsilon (92.53\%)$	$^{186}\text{W}(2n, \gamma) ^{188}\text{W} \rightarrow ^{188}\text{Re}$	Р	
^{211}At	7.2	час	Альфа-радиотерапия	$\text{E} (58.2\%)$ $\alpha (41.8\%)$	$^{209}\text{Bi}(\alpha, 2n) ^{211}\text{At}$	Ц	
^{212}Pb	10.64	час	Бета-радиотерапия	$\beta -$	$^{232}\text{Th}(p, x) ^{228}\text{Th}(\text{ч}) \rightarrow ^{212}\text{Pb}$ $^{233}\text{U}(50 \text{ лет}) \rightarrow ^{228}\text{Th}/^{212}\text{Pb}$	Ц —	
^{223}U	55	мкс	Альфа-радиотерапия	α	$^{232}\text{Th}(^1\text{H}, 3n) ^{230}\text{Pa} \rightarrow ^{223}\text{U}$	Ц	
^{225}Ac	45.6	мин	Терапия, тераностика	$\beta -$	$^{232}\text{Th}(p, 2p \text{ xn}) ^{225}\text{Ac}$	Ц	

Примечание. Ц – циклотрон, Р – реактор, Г – генератор.

приведет к резкому снижению расхода делящихся материалов в технологическом процессе и выхода высокоактивных отходов. Оценки показывают, что растворный реактор тепловой мощностью ~50 кВт может обеспечить значительную долю современных потребностей РФ в таких важнейших медицинских радиоизотопах, как ^{89}Sr и ^{99}Mo , при резком снижении их себестоимости.

2.2. Ускорительный комплекс

Уникальные возможности НИЦ “Курчатовский институт” в области ускорительных технологий позволяют решать широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований, связанных с наработкой диагностических и терапевтических радионуклидов.

Изохронный циклотрон НИЦ “Курчатовский институт” (Циклотрон У-150) работает с 1947 г. и является единственной в Российской Федерации универсальной циклотронной установкой, предназначенной для получения ускоренных пучков заряженных частиц от ионов водорода до ионов кремния. Основные характеристики циклотрона У-150 приведены в табл. 2.

При таких параметрах циклотрона можно производить практически все наиболее востребованные в ядерной медицине циклотронные радионуклиды.

На сегодня на циклотроне У-150 реализованы следующие технологии производства радионуклидов:

- производство ^{201}Tl из ^{203}Tl (твердотельная мишень);
- производство ^{123}I из ^{124}Xe (газовая мишень).

Также проводятся научно-исследовательские работы, связанные с наработкой следующих изотопов: ^{149}Tb , ^{152}Tb , ^{155}Tb , ^{211}At , ^{67}Cu , ^{186}Re , ^{89}Zr , ^{111}In , ^{67}Ga , ^{47}Sc , $^{117\text{m}}\text{Sn}$, ^{119}Sb , ^{64}Cu , ^{68}Ge , ^{124}I , ^{68}Y , ^{82}Sr , ^{44}Ti [7–10].

На базе ускорителя У-150 проведены исследования различных ядерных реакций, приводящих к образованию инновационных радионуклидов, таких как ^{167}Tm , ^{165}Er , ^{169}Yb [11–13].

Также предложены новые способы получения трех изотопов тербия – ^{149}Tb , ^{152}Tb , ^{155}Tb . Сочетание компетенций в области ядерной физики и радиохимии позволило установить оптимальные условия производства этих радионуклидов и разработать методики их радиохимического выделения.

Изотопы тербия (^{149}Tb , ^{152}Tb , ^{155}Tb , ^{161}Tb) представляют особый интерес, так как наличие разных типов излучений и различие в периодах полураспада позволяют создать линейку радиофармпрепаратов, направленных на диагностику и лечение различных видов рака. Сегодня НИЦ

Таблица 2. Основные характеристики циклотрона У-150

Тип ионов	Максимальная энергия, МэВ	Интенсивность (максимальная), мкА
Протоны (H+)	35	30 (50)
Дейтроны (2H+)	20	30 (30)
Ионы гелия-3 (3He+2)	70	20 (30)
α -частицы (4He+2)	60	15 (40)

“Курчатовский институт” совместно с Московским государственным университетом им. М.В. Ломоносова и Санкт-Петербургским политехническим университетом Петра Великого ведет разработку отечественного инновационного тераностического препарата на основе изотопов тербия для проведения радиоиммунной терапии злокачественных новообразований различного гистологического типа.

Кроме того, ^{152}Tb может быть использован как изотопная пара к ^{177}Lu . Благодаря позитронному излучению ^{152}Tb можно методом позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ) выявить пациентов, имеющих отклик к терапевтическому препарату на основе ^{177}Lu и рассчитать необходимую дозировку препарата [14]. Таким образом, применение новых радионуклидов и их комбинаций позволяет реализовать концепцию персонализированной медицины.

Кроме того, Курчатовский циклотрон У-150 является единственным поставщиком медицинского изотопа ^{123}I для производства радиофармпрепаратов для клиник г. Москвы и Московского региона. Важно отметить высокую социальную значимость РФЛП на основе ^{123}I при диагностике онкологических заболеваний у детей, в том числе характеризующихся агрессивным клиническим течением, таких как нейробластомы. Кроме того, разработанный научным коллективом У-150 в 2021 г. метод облучения мишени ^{124}Xe позволил сегодня увеличить в ~2–3 раза производительность получения ^{123}I .

В НИЦ “Курчатовский институт” также установлен автоматизированный компактный ускоритель отрицательных ионов Eclipse HP Cyclotron (энергия до 11 МэВ) для производства ПЭТ-радионуклидов ^{18}F , ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O . Регулярно проводится облучение жидкостных мишеней для производства РФЛП, меченных ^{18}F . Циклотрон является базовой установкой ПЭТ-центра, функционирующего на московской площадке Курчатовского института.

Еще один изохронный циклотрон Ц-80 с энергией выведенного протонного пучка 40–80 МэВ и интенсивностью до 100 мкА расположен в г. Гат-

чина, Ленинградская область. Его запуск был проведен в 2017 г., сегодня ведутся работы по его модернизации с целью создания на базе Ц-80 радиоизотопного комплекса, позволяющего обеспечить производство широкого спектра медицинских циклотронных радионуклидов для лечения целого ряда онкологических, кардио-сосудистых, неврологических и офтальмологических заболеваний.

2.3. Генераторы радионуклидов

Одним из способов получения альфа-излучателей для точечной радиоиммунотерапии является радиохимическое выделение из долго выдержанного сырьевого материала ^{233}U . По совокупности ядерно-физических и медико-биологических параметров наиболее перспективными альфа-излучателями считаются ^{213}Bi и ^{225}Ac . ^{213}Bi является продуктом распада цепочки радионуклидов, начальный элемент которой ^{229}Th может быть получен, например, из старых запасов ^{233}U . Специалистами Курчатовского института совместно с сотрудниками Объединенного института ядерных исследований разработаны генераторные способы получения ^{225}Ac из ^{229}Th , ^{213}Bi из ^{225}Ac и ^{212}Pb из ^{228}Th .

2.4. Производство и контроль качества радиофармацевтических лекарственных препаратов

Со дня основания в НИЦ “Курчатовский институт” реализуется междисциплинарный подход, нацеленный на замкнутый цикл: от проведения фундаментальных исследований до внедрения конечных технологий.

Сегодня в Курчатовском институте на базе циклотрона Eclipse HP создано производство серии РФЛП для диагностики злокачественных заболеваний методом ПЭТ на основе ^{18}F . Это ^{18}F -фтордезоксиглюкоза, ^{18}F -PSMA-1007, ^{18}F -фторхолин. Для получения РФЛП используются автоматические модули синтеза, установленные в защитных боксах. Препарат производится постоянно и применяется в медицинских учреждениях Москвы. Производство и контроль качества осуществляются в соответствии с требованиями GMP (Good Medical Practice).

Создание новых РФЛП невозможно без проведения полноценных доклинических исследований на животных. Сегодня на базе НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ успешно функционирует исследовательский комплекс отделения молекулярной и радиационной биофизики, имеющий в своем составе центр доклинических и клинических исследований (ЦДКИ) – опытно-производственную научную лабораторию миро-

вого уровня, включающую в себя экспериментально-биологическую клинику и радиофармакологический блок. ЦДКИ позволяет проводить полный цикл фундаментальных, скрининговых и доклинических исследований лекарственных препаратов различных фармакологических групп и их компонентов (за исключением работ с особо опасными инфекциями и наркотическими и психотропными соединениями), средств ядерной медицины (2 класс работ с источниками ионизирующего излучения) с их последующим внедрением в клиническую практику в соответствии с принципами Good Laboratory Practice, национальными и международными стандартами.

В рамках реализации ФНТП планируется расширение имеющегося потенциала в рамках реализации проектов “ОКО”–“ИЗОТОП” – модернизация циклотрона Ц-80, на базе которого будет создан типовой радиохимический комплекс по наработке радионуклидов с последующим синтезом РФЛП на их основе, а также запланировано создание четырех комплексов адронной терапии, входящих в состав НОМЦ ЯМ НИЦ “Курчатовский институт”, а именно:

- комплекс протонной лучевой терапии НИЦ “Курчатовский институт”, г. Москва (проект “Луч-Протон”);

- онкоофтальмологический комплекс ПЛТ на базе циклотрона Ц-80 НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, г. Гатчина (проект “ОКО”);

- экспериментально-клинический комплекс ионной лучевой терапии на базе действующего ускорительного комплекса У-70 НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, г. Протвино (проект “Луч У70”);

- прототип типового комплекса ионной лучевой терапии в составе типового клинического центра ионной (углеродной) лучевой терапии с целью последующего тиражирования в регионах РФ НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, г. Протвино (проект “Луч-Тип-Ион”).

3. УСТАНОВКИ КУРЧАТОВСКОГО НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО МЕДИЦИНСКОГО ЦЕНТРА ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ

3.1. Комплекс по наработке радионуклидов на базе циклотрона Ц-80

Создание инновационного радиоизотопного комплекса на базе действующего циклотрона Ц-80 (“ИЗОТОП”), расположенного на территории НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ, предназначено для наработки широкого спектра медицинских радионуклидов, используемых при диагностике и терапии онкологических заболеваний. Основные параметры протонного пучка, используемого для наработки радионуклидов, приведены в табл. 3. Радионуклиды, планируемые

к получению в рамках реализации проекта “ИЗОТОП”, представлены в табл. 4 и 5.

Создаваемый радиоизотопный комплекс будет иметь в своем составе следующее новое оборудование и системы:

- инновационная масс-сепараторная мишенная станция;
- мишенная станция для высокотемпературного выделения целевых радионуклидов;
- мишенная станция для радиохимического выделения целевых радионуклидов.

План расположения основных узлов технологического оборудования схематически представлен на рис. 4.

Подобный уникальный комплекс позволит обеспечить наработку как генераторных радионуклидов ^{82}Sr и ^{68}Ge , так и альфа-эмиттеров высокой частоты ^{225}Ac для терапии злокачественных образований на ранней стадии. Кроме того, подобный комплекс позволит получить широкий спектр радионуклидов, включая ^{212}Pb , ^{223}Ra , ^{224}Ra , а в перспективе создать инновационную GMP-лабораторию для организации замкнутого цикла по разработке и производству РФЛП.

Назначение инновационного радиоизотопного комплекса на базе действующего циклотрона Ц-80 не ограничивается получением широкого спектра радиоизотопов и изотопически чистых медицинских радионуклидов с использованием инновационного масс-сепараторного метода. Планируется многолетнее использование комплекса для разработки перспективных методов получения радионуклидов для диагностики и терапии различных онкологических и других заболеваний, проведение образовательных программ и подготовка высококвалифицированных кадров.

3.2. Комплекс протонной лучевой терапии

Создание комплекса протонной лучевой терапии (“Луч-Протон”), размещаемого на территории НИЦ “Курчатовский институт”, предназначено для многолетних разработок оборудования и технологий ПЛТ новых поколений и подготовки кадров (медицинских физиков и клиницистов).

Основные параметры комплекса протонной лучевой терапии (Комплекс ПЛТ) НИЦ “Курчатовский институт” приведены в табл. 6.

Концепцией создания комплекса “Луч-Протон” предусмотрены разработка и оснащение комплекса тремя основными элементами оборудования – ускоритель с каналами транспортировки протонных пучков в два процедурных помещения, лучевая установка гантри для многопольного облучения пациента в положении лежа и лучевая установка с фиксированным в горизон-

Таблица 3. Параметры протонного пучка

Параметр	Значение
Энергия протонов, МэВ	40–80
Максимальная интенсивность, мкА	100
Диаметр на входе в мишень, мм	20–50
Неравномерность плотности тока по сечению, %	не более ± 3
Максимальное время облучения в непрерывном режиме, ч	300

Таблица 4. Радионуклиды, планируемые к получению

Наименование	$T_{1/2}$	Активность (Ки)
^{68}Ge	270.8 дн.	2
^{82}Sr	25.55 дн.	14
^{99}Tc	6.0 ч	8
^{64}Cu	12.4 дн.	26
^{67}Cu	2.58 дн.	8
^{212}Bi	1.01 ч	0.45

Таблица 5. Радионуклиды, планируемые к получению изотопически чистыми (с использованием масс-сепаратора)

Наименование	$T_{1/2}$	Активность (Ки)
^{111}In	2.8 дн.	14
^{123}I	13.27 ч	25
^{124}I	4.17 дн.	60
^{149}Tb	4.1 ч	3
^{223}Ra	11.4 дн.	3
^{224}Ra	3.66 дн.	0.45
^{225}Ac	10.0 дн.	0.12

тальной плоскости направлением протонного пучка для облучения пациента в положении сидя.

В качестве ускорителя для Комплекса ПЛТ НИЦ “Курчатовский институт” будет разработан протонный синхротрон, позволяющий осуществлять выбор энергии выводимых из него пучков протонов в диапазоне от 70 до 250 МэВ и изменять ее от одного цикла ускорения к другому. Таким образом, вывод протонов не при максимальной, как в циклотроне, а при требуемой для конкретного пациента энергии и высокая эффективность вывода делают протонный синхротрон более удобной машиной в эксплуатации и более безопасной в радиационном смысле.

Отметим, что гибкая конфигурация Комплекса “Луч-Протон” (рис. 5) предлагает комплексное и настраиваемое решение для ПЛТ, позволяет оснащать как однокабинные, так и многокабин-

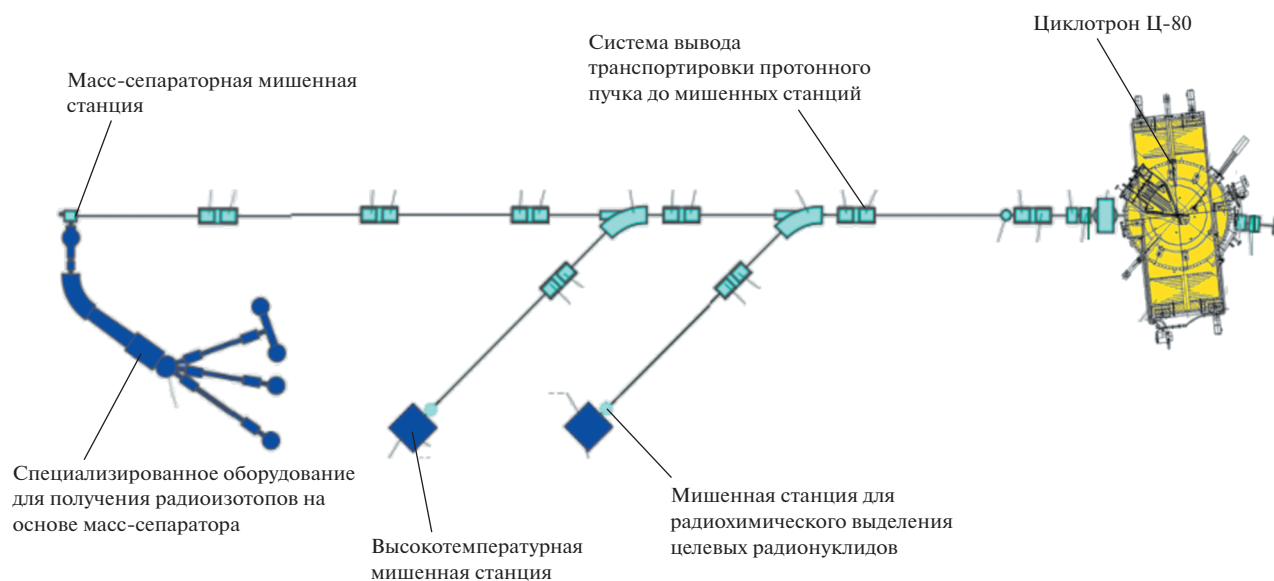


Рис. 4. Схема конфигурации комплекса “ИЗОТОП”.

ные центры в соответствии с клиническими и исследовательскими задачами. Возможные варианты процедурных кабинетов включают в себя гантри полного (на 360°) поворота протонного пучка, кабинета с фиксированным направлением

протонного пучка для проведения терапии пациентов с новообразованиями глаза, головы и шеи в положении сидя, исследовательские кабинеты для неклинического применения пучка протонов.

Таблица 6. Основные характеристики комплекса “Луч-Протон”

	Наименование параметра установки	Значение
1	Ускорительный комплекс	
1.1	Ускоритель	Протонный синхротрон
1.2	Энергия ускоренных протонов	70–250 МэВ
1.3	Интенсивность	5×10^{10} протонов в секунду
2	Лучевая установка Гантри	
2.1	Энергия протонов	70–250 МэВ
2.2	Поворот протонного пучка	$\pm 185^\circ$
2.3	Система формирования дозового распределения	активно/пассивная
2.4	Максимальный размер дозового распределения	$25 \times 25 \text{ см}^2$
2.5	Система позиционирования	2D-и 3D-система рентгеновского позиционирования
2.6	Позиционер	6D-стол позиционер
2.7	Локализации	– голова, шея; – новообразования абдоминальной области
3	Лучевая установка с фиксированным направлением протонного пучка	
3.1	Энергия протонов	70–250 МэВ
3.2	Система формирования дозового распределения	пассивная
3.3	Максимальный размер дозового распределения	$25 \times 25 \text{ см}^2$
3.4	Система позиционирования	2D-система рентгеновского позиционирования
3.5	Позиционер	кресло позиционер
3.6	Локализации	– голова, шея; – внутриглазные новообразования; – новообразования орбиты глаза

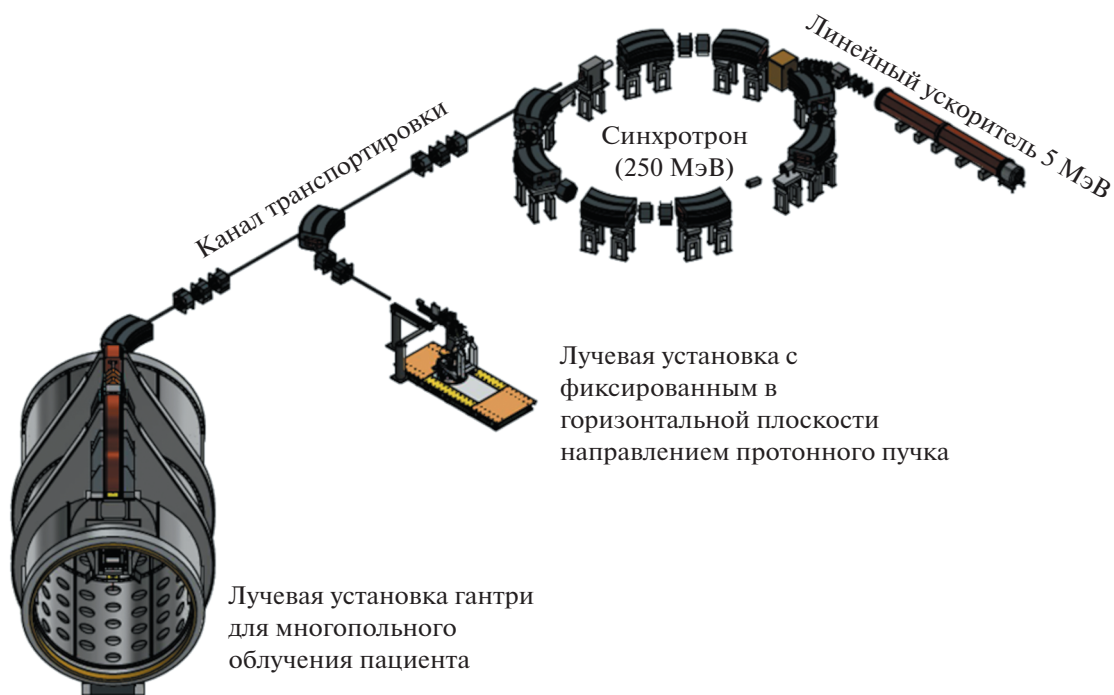


Рис. 5. Схема конфигурации комплекса “Луч-Протон”.

Оборудование и технологии ПЛТ в последние три десятилетия во всем мире постоянно совершенствуются, предлагаются и отрабатываются новые, зачастую принципиальные решения, которые затем внедряются в рутинную практику лечения. В соответствии с этой общемировой тенденцией назначение Комплекса ПЛТ НИЦ “Курчатовский институт” не ограничивается созданием опытного образца типового клинического центра ПЛТ. Планируется долговременное многолетнее использование Комплекса ПЛТ НИЦ “Курчатовский институт” для развития проблемы – разработки и испытаний новых аппаратных средств и технологий ПЛТ, а также подготовки кадров.

3.3. Онкоофтальмологический комплекс протонной лучевой терапии на базе циклотрона Ц-80

Создание онкоофтальмологического комплекса на базе действующего циклотрона Ц-80, размещаемого на территории НИЦ “Курчатовский институт” – ПИЯФ (“ОКО”), предназначено для обеспечения высокотехнологичными средствами лечения пациентов со сложными онкоофтальмологическими заболеваниями Северо-Западного региона России и частично из других регионов страны. Основные параметры онкоофтальмологического комплекса на базе действующего циклотрона Ц-80 приведены в табл. 7.

Создаваемый онкоофтальмологический комплекс будет иметь в своем составе следующее новое оборудование и системы:

Таблица 7. Основные характеристики комплекса “ОКО”

Наименование	Значение
Энергия протонов	70 МэВ
Интенсивность	1.0–1.5 мкА
Диаметр	60 мм
Расходимость	не более 3 мрад
Неравномерность плотности тока по сечению	не более ±3%
Высота оси пучка относительно пола процедурного кабинета	1500 мм
Система формирования дозового распределения	пассивная
Система позиционирования	2D-система рентгеновского позиционирования
Позиционер	кресло позиционер
Локализации	– внутриглазные новообразования; – новообразования орбиты глаза

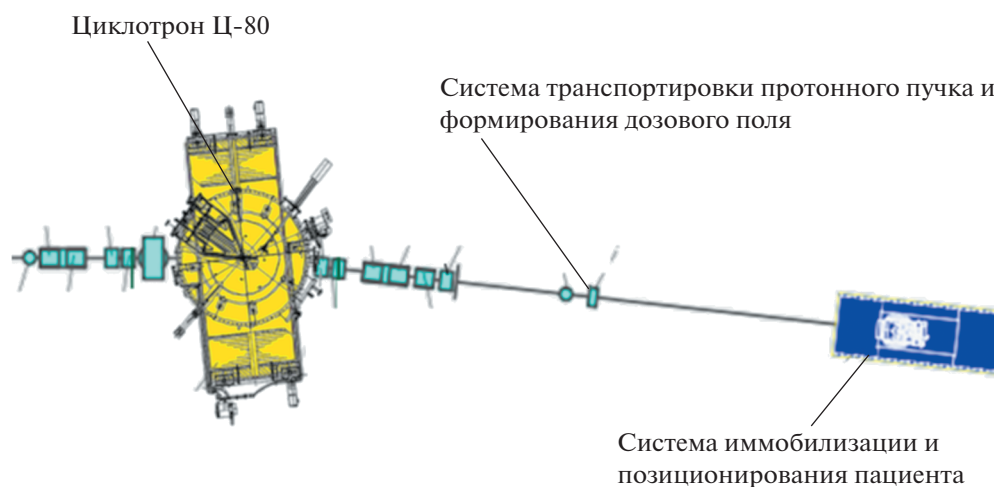


Рис. 6. План расположения основных узлов технологического оборудования.

- инновационное кресло-позиционер с системой управления;
- устройство транспортировки терапевтического протонного пучка от ускорителя к лучевой установке (ЛУ);
- устройства формирования дозового поля;
- система мониторинга пучка и поглощенной дозы;
- система позиционирования пациента;
- программно-аппаратный комплекс (ПАК), интегрированный в автоматизированную систему управления технологическим процессом и лучевой установкой (АСУ ТП и АСУ ЛУ);
- помещение для подготовки пациентов к процедуре.

Предполагаемый план расположения основных узлов технологического оборудования схематически представлен на рис. 6.

В результате реализации проекта северо-западный регион России будет обеспечен высокотехнологичными медицинскими средствами лечения сложных онкофтальмологических заболеваний: внутриглазных новообразований, новообразований орбиты и придаточного аппарата глаза.

3.4. Экспериментально-клинический комплекс ионной лучевой терапии на базе действующего ускорительного комплекса У-70

Создание экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии (**Комплекс ИЛТ**) на базе действующего ускорительного комплекса У-70 (“Луч У-70”), размещаемого на территории НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, предназначено для отработки технологии лечения пучком ионов углерода пациентов с радиорезистентными онкологическими новообразованиями. В дальнейшем данный центр будет также использоваться для многолетних разработок

оборудования и технологий ИЛТ новых поколений и подготовки кадров (медицинских физиков и клиницистов).

Основные параметры экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии на базе действующего ускорительного комплекса У-70 НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ приведены в табл. 8.

В качестве ускорителя для экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии будет использована действующая ускорительная инфраструктура У-70 НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ.

Создаваемый экспериментально-клинический комплекс будет иметь в своем составе следующее новое оборудование и системы:

- комплекты магнитооптического оборудования для формирования и транспортировки углеродного пучка в три медицинские кабины;
- растровые системы формирования полей облучения для лечения по двум методикам: облучение “широким” и “узким” (карандашным) пучками;
- сертифицированные комплекты оборудования для дозиметрического (верификация дозы облучения) и рентгеновского (верификация зон облучения) сопровождения терапии;
- три медицинские кабины с комплексом медицинского оборудования;
- прецизионный шестикоординатный стол для позиционирования пациента (в каждой медицинской кабине) согласно рис. 7.

Конфигурация комплекса представлена на рис. 8.

Назначение Комплекса “Луч У-70” не ограничивается клинической апробацией технологий лечения онкологических новообразований с использованием ИЛТ. Планируются многолетнее

использование Комплекса для разработки протоколов лечения онкологических новообразований различных нозологий, устойчивых к другим видам излучений, используемым в лучевой терапии, проведение образовательных программ и подготовка высококвалифицированных кадров.

3.5. Прототип типового комплекса ионной лучевой терапии

Создание прототипа типового комплекса ионной лучевой терапии (“Луч-Тип-Ион”), размещаемого на территории НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ, предназначено для освоения и отработки технологии поточного лечения пучком ионов углерода радиорезистентных онкологических новообразований с целью дальнейшего тиражирования.

Основные параметры синхротрона для прототипа типового комплекса ионной лучевой терапии НИЦ “Курчатовский институт” – ИФВЭ приведены в табл. 9.

Концепцией создания комплекса “Луч-Тип-Ион” предусмотрены разработка и оснащение комплекса следующим новым оборудованием и системами:

- специализированный углеродный синхротрон для лучевой терапии;
- комплекты магнитооптического оборудования формирования и транспортировки углеродного пучка в три медицинские кабины;
- растровые системы формирования дозового поля облучения для лечения по методике сканирования опухоли “узким” (карандашным) пучком;
- сертифицированные комплекты оборудования для дозиметрического (верификация дозы облучения) и рентгеновского (верификация зон облучения) сопровождения терапии;
- прецизионный шестикоординатный стол для позиционирования пациента (в каждой медицинской кабине).

Компоновку комплекса предполагается реализовать аналогичной уже действующим ионным комплексам The Heidelberg Ion Therapy Center (НИТ) и The Marburg Particle Therapy Center (МПТ) в Германии и применить отечественные апробированные технические решения, такие как источник ионов, инжектор, линейный ускоритель и другие системы синхротрона.

На рис. 9 показано компоновочное решение, которое реализуется при проектировании.

Система каналов транспортировки обеспечивает доставку пучка ионов углерода от синхротрона к трем медицинским процедурным кабинам.

Две процедурные кабины предполагается использовать для облучения пациентов горизон-

Таблица 8. Основные параметры экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии

Наименование	Значение
Кинетическая энергия ионов $^{12}\text{C}^{6+}$ МэВ на нуклон	150–450
Пробег в воде максимальный	280 мм в мишени
Пробег в воде минимальный	50 мм
Точность подстройки пробега	1 мм
Средняя мощность дозы	2 Гр/мин
Размер поля облучения	200 × 200 мм ²
Максимальный облучаемый объем	2 л
Равномерность дозы	±2.5%
Система вывода пучков из ускорителя	медленный вывод, синхронный с дыханием пациента
Количество процедурных кабин	≥3
Предполагаемые направления пучков, направляемых на мишень	2 горизонтальных (0°) 1 наклонное (до 45°)
Время укладки пациента	30 мин
Время облучения пациента	2–3 мин

Таблица 9. Основные параметры синхротрона для прототипа типового комплекса ионной лучевой терапии

Наименование	Значение
Кинетическая энергия ионов $^{12}\text{C}^{6+}$ МэВ на нуклон	150–430
Максимальная магнитная жесткость $B\rho$, Тл м	6.62
Максимальное поле в поворотных магнитах B , Тл	1.3–1.4
Радиус кривизны орбиты в поворотных магнитах ρ , м	5.10
Длина орбиты Π , м	79.92
Средний радиус орбиты $R = \Pi/2\pi$, м	12.7
Отношение длины магнитной дорожки к периметру орбиты, $2\pi\rho/\Pi = \rho/R$	0.4
Количество суперпериодов магнитной структуры	6
Количество поворотных магнитов $D(15^\circ)$	24
Структура фокусировки	FODO ($\pi/2$)
Количество квадрупольных линз, из них:	36
фокусирующих QF,	18
дефокусирующих QD	18



Рис. 7. Внешний вид прецизионного 6D-стола для облучения пациентов горизонтальным пучком.

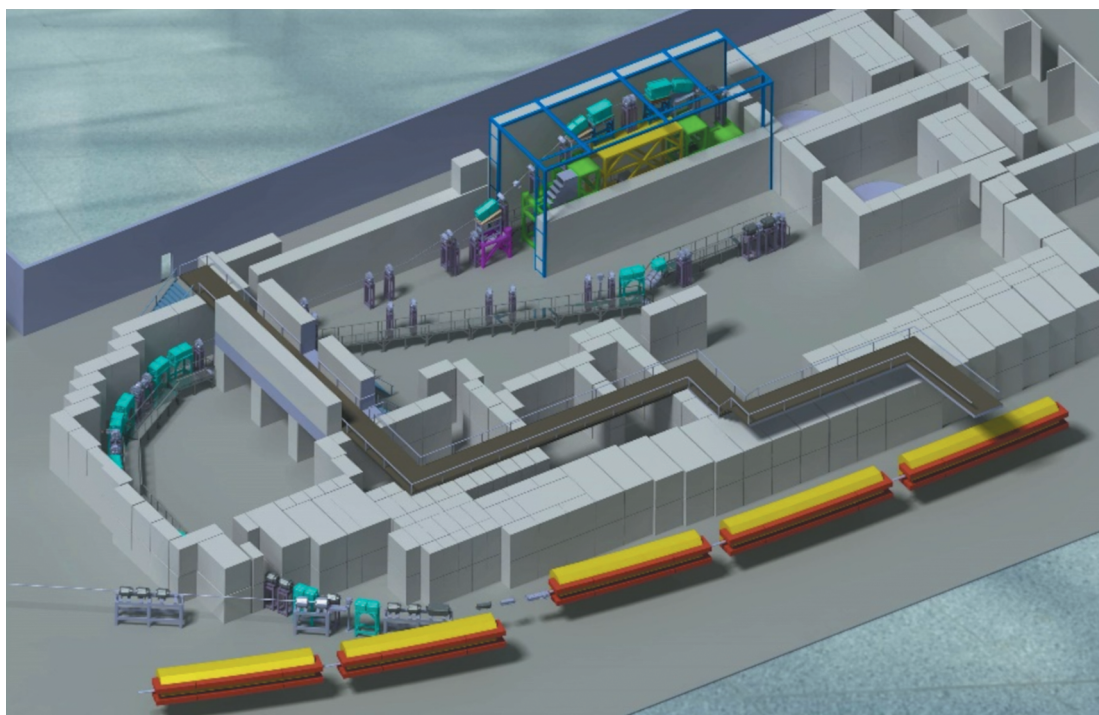


Рис. 8. Конфигурация экспериментально-клинического комплекса ионной лучевой терапии.

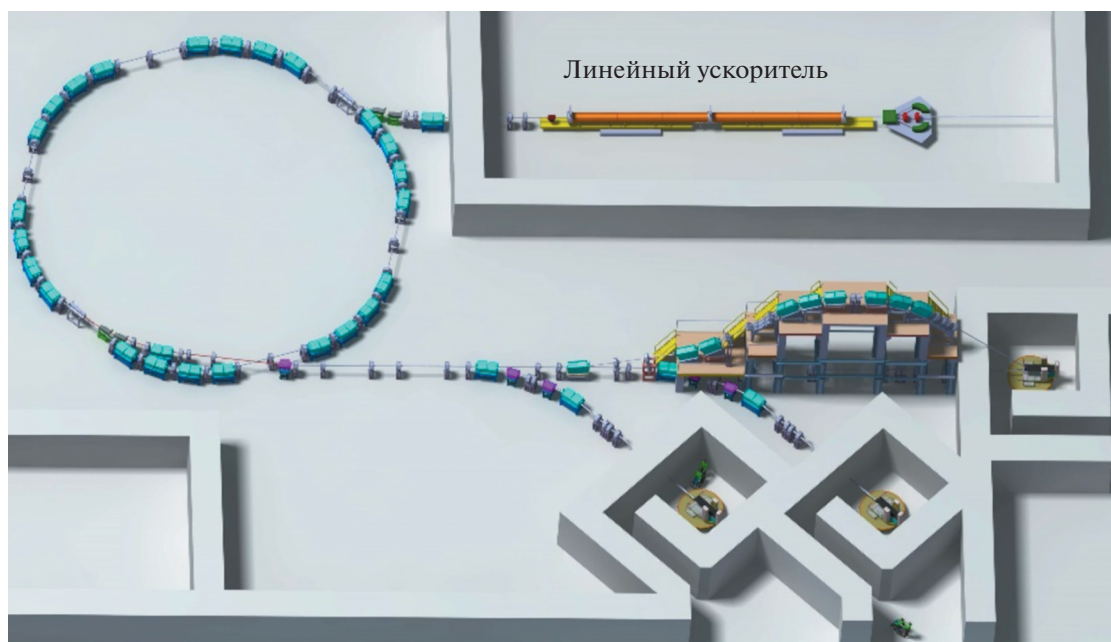


Рис. 9. Вид ионного лучевого терапевтического комплекса с тремя горизонтальными пучками и одним пучком 45° в вертикальной плоскости.

тальными пучками (0°), а третью — горизонтальным пучком и наклонным пучком с углом наклона 45° в вертикальной плоскости.

Оборудование и технологии ИЛТ в последние три десятилетия во всем мире постоянно совершенствуются, предлагаются и отрабатываются новые, зачастую принципиальные решения, которые затем внедряются в рутинную практику лечения. В соответствии с этой общемировой тенденцией назначение Комплекса ИЛТ “Луч-Тип-Ион” не ограничивается созданием опытного образца типового клинического центра ИЛТ. Планируется многолетнее использование Комплекса ИЛТ “Луч-Тип-Ион” для поточного лечения пациентов и развития проблемы — разработки протоколов лечения онкологических новообразований различных нозологий, устойчивых к другим видам излучений, используемым в лучевой терапии, а также подготовки кадров.

4. РЕАЛИЗАЦИЯ КЛАСТЕРНОГО ПОДХОДА В ОБЛАСТИ ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ НА БАЗЕ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ НИЦ “КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ”

Уже сегодня проекты, реализуемые на базе НИЦ “Курчатowski институт”, позволяют говорить об активном развитии в стране направления ядерной медицины и внедрении единого кластерного подхода, позволяющего сформировать междисциплинарную платформу для введения полного цикла создания ядерных и ускорительных

технологий от научно-исследовательских и опытных разработок до их внедрения и применения в клинической практике, а также снижения барьеров выхода на новые сегменты рынка товаров за счет стандартизации и унификации требований, обеспечения комплексного подхода в рамках кластера.

В рамках реализации ФНТП подобный кластер будет сформирован на основе описанного выше НОМЦ ЯМ НИЦ “Курчатowski институт” (рис. 10), представляющего собой научную и физико-техническую базу для разработки и создания отечественного типового клинического модульного (с возможностью вариативности структуры и состава отделений) центра ядерной медицины для субъектов Российской Федерации.

В Курчатowski НОМЦ ЯМ с привлечением при необходимости профильных научных, образовательных и медицинских организаций будет проводиться не только разработка, но и клиническая апробация и отработка современных методов диагностики и лечения пациентов, основанных на применении ядерных технологий и соответствующего отечественного оборудования.

Учитывая имеющий место кадровый дефицит российского здравоохранения, подобный центр, оснащенный широким спектром современной радиологической аппаратуры и располагающий высококвалифицированными специалистами, будет, несомненно, обладать высоким потенциалом для организации образовательной деятельности. В качестве образовательной базы будет ис-



Рис. 10. Кластер ядерной медицины на основе НОМЦ ЯМ НИЦ “Курчатовский институт”.

пользоваться уже имеющаяся инфраструктура НИЦ “Курчатовский институт” и создаваемая в рамках ФНТП, а также клиническая база медицинских организаций – партнеров.

Кроме того, подобная инфраструктура позволит обеспечить научно-методическое, физико-техническое и экспертное сопровождение при проектировании модульных клинических центров ядерной медицины.

Таким образом, возможность тиражирования и оснащения российского здравоохранения подобными типовыми центрами ядерной медицины позволит существенно повысить доступность высокотехнологичной медицинской помощи в стране и внесет существенный вклад в достижение национальных целей, определенных Указом Президента Российской Федерации от 21 июля 2020 г. № 474 “О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года”.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современное развитие ядерной медицины и медицинской радиологии неразрывно связано с применением междисциплинарных подходов, обеспечением доступности широкого спектра нового оборудования и методов, а также оперативным внедрением соответствующих инновационных технологий и методик в медицинскую практику.

Основоположник развития ядерной медицины и лучевой терапии в нашей стране НИЦ “Курчатовский институт” на сегодня представ-

ляет собой место консолидации трех ключевых составляющих, необходимых для создания новых поколений оборудования и методов в области ядерной медицины и лучевой терапии: знания и компетенции в области создания и внедрения ядерных и ускорительных технологий, уникальная ядерно-физическая инфраструктура и высококвалифицированные специалисты, обладающие богатым междисциплинарным опытом работы.

Создание НОМЦ ЯМ позволит значительно расширить имеющийся потенциал за счет разработки и внедрения современного оборудования отечественного производства, а также создания прототипа типового клинического центра ядерной медицины. Кроме того, реализация кластерного подхода в рамках данного проекта позволит сформировать междисциплинарную платформу для внедрения полного цикла создания ядерных и ускорительных технологий: от научно-исследовательских и опытных разработок до применения их в клинической практике.

Таким образом, возможность тиражирования и оснащения российского здравоохранения подобными типовыми центрами ядерной медицины на базе отечественного оборудования позволит существенно повысить доступность высокотехнологичной медицинской помощи в стране и внесет существенный вклад в достижение национальных целей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агеева Л.И., Александрова Г.А., Голубев Н.А. и др.* // Росстат. 2021. С. 37.
2. *Gordon K.B., Smyk D.I., Gulidov I.A.* // Современные технологии в медицине. 2021. Т. 13. № 4. С. 70. <https://doi.org/10.17691/stm2021.13.4.08>
3. *Забелин М.В., Климанов В.А., Галяутдинова Ж.Ж. и др.* // Исследования и практика в медицине. 2018. Т. 5. № 1. С. 82. <https://doi.org/10.17709/2409-2231-2018-5-1-10>
4. *Клёнов Г.И., Хорошков В.С.* // Успехи физ. наук. 2016. Т. 186. № 8. С. 891.
5. *Aliev R.A., Zagryadskiy V.A., Kormazeva E.S. et al.* // Atomic. Energy. 2021. V. 130. P. 36. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00770-3>
6. *Moiseeva A.N., Aliev R.A., Kormazeva E.S. et al.* // Appl. Radiat. Isot. 2021. V. 609–170. P. 109.
7. *Kazakov A.G., Aliev R.A., Ostapenko V.S. et al.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2018. V. 605–11. P. 317.
8. *Moiseeva A.N., Aliev R.A., Unezhev V.N. et al.* // Sci. Rep. 2020. V. 10. P. 508.
9. *Aliev R.A., Zagryadskiy V.A., Latushkin S.T. et al.* // At. Energy. 2021. V. 326–8. P. 129.
10. *Moiseeva A.N., Aliev R.A., Furkina E.B. et al.* // Nucl. Med. Biol. 2021. V. 106–107. P. 52.
11. *Kormazeva E.S., Khomenko I.A., Unezhev V.N., Aliev R.A.* // Appl. Radiat. Isot. 2021. V. 177. P. 109.
12. *Алиев Р.А., Кормазева Е.С., Фуркина Е.Б. и др.* // Российские нанотехнологии. 2020. Т. 15. С. 451.
13. *Aliev R.A., Khomenko I.A., Kormazeva E.S.* // J. Radioanal. Nucl. Chem. 2021. V. 983–989. P. 329. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07865-y>
14. *Moiseeva A.N., Aliev R.A., Unezhev V.N. et al.* // Nucl. Instrum. Methods. B. 2021. V. 497. P. 59.