

Е.М. Иванов, Г.И. Клёнов, В.И. Максимов, В.С. Хорошков, А.Н. Черных

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ В РОССИИ

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва

Контактное лицо: Алексей Николаевич Черных, e-mail: chernykh-aleksey@yandex.ru

### РЕФЕРАТ

Сегодня общепризнано, что протонная терапия (ПЛТ) является одним из самых эффективных методов дистанционного лучевого лечения. Она позволяет обеспечивать условия конформности облучения, недостижимые при использовании самых современных и совершенных средств дистанционной лучевой терапии – медицинских линейных ускорителей, генерирующих пучки электронов и тормозное гамма излучение. Точность совмещения 90–95 %-ой изодозы по всему трехмерному контуру (границам) мишени и градиент спада дозы на границе мишени для протонного излучения заведомо выше, а интегральная доза на здоровые ткани и структуры всегда примерно в два раза ниже, чем при гамма-облучении. Это всегда подтверждается простым сравнением гистограмм доза–объем с использованием конвенционального (гамма, электроны) и протонного излучений, построенных для одних и тех же реальных клинических случаев. Возможность снижения интегральной дозы при ПЛТ представляется особенно важной, поскольку сегодня удается обеспечивать длительный срок жизни онкологических больных, а неприятные последствия (отложенные лучевые реакции и осложнения), обусловленные высокой интегральной дозой, зачастую проявляются через много лет после лечения. Это качество протонного излучения заставляет также считать ПЛТ незаменимым инструментом в детской онкологии.

Длительные клинические исследования, проведенные в 1954–1990 гг. в 10 экспериментальных центрах, в основном, в США (50 % клинического опыта) и в России (30 %) подтвердили изложенные выше преимущества ПЛТ. Эти клинически подтвержденные результаты явились убедительным основанием быстрого сооружения с 1990 г. во всех развитых странах крупных (на потоки 1 тыс. и более больных в год) клинических центров ПЛТ при онкологических и многопрофильных госпиталях. Сегодня в мире работает 96 таких центров и 38 сооружается. Россия, обладающая громадным опытом в этой проблеме, оказалась вне качественно нового этапа развития ПЛТ. Более того, к 2014 г. все три действующих в стране экспериментальных центра ПЛТ в Москве, Дубне и С.-Петербурге прекратили лечение больных. Таким образом, сегодня страна на 30 лет отстала от общемирового уровня.

В марте 2020 г. Правительство РФ принимает Постановление № 287, в котором предусмотрена Программа ликвидации к 2027 г. этого отставания. Головной научной организацией по выполнению Программы определен НИЦ «Курчатовский институт», имеющий максимальный опыт, научный потенциал и компетенции в проблеме.

В статье представлены создаваемые и подготавливаемые к тиражированию в рамках Программы объекты, основные цели и этапы выполнения Программы.

**Ключевые слова:** протонная лучевая терапия (ПЛТ), синхротрон, клинический центр ПЛТ, перспективы развития

**Для цитирования:** Иванов Е.М., Клёнов Г.И., Максимов В.И., Хорошков В.С., Черных А.Н. Перспективы развития протонной терапии в России // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2022. Т. 67. № 3. С. 41–46. DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-3-41-46

E.M. Ivanov, G.I. Klenov, V.I. Maksimov, V.S. Khoroshkov, A.N. Chernykh

## Prospects for the Development of Proton Therapy in Russia

National Research Centre “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

Contact person: A.N. Chernykh, e-mail: chernykh-aleksey@yandex.ru

### АБСТРАКТ

It is generally accepted that a proton therapy is one of the most effective method of external beam radiotherapy. Proton therapy has the highest conformal factor even compared with the most modern facilities for radiotherapy which use electron beam or gamma rays. Accuracy of combination of the 90–95 % isodose surface with PTV is better and dose gradients outside PTV is steeper, also integral dose of radiation from proton therapy for a healthy tissue is less than two times that for gamma irradiation. We can clearly see it comparing a HDV of treatment plan for gamma irradiation and proton therapy for the same clinical cases. In last years a lifespan of patient after radiotherapy treatment is a quit extended, so a question for quality of life for them is more significant. Decreasing of integral dose for a healthy tissue reduces a chance of negative effects from radiotherapy that would mostly appear after a lot years after treatment, so named late side effects. Quality of life is even more important in the case of pediatric oncology, when we not only expect a long healthy life for them, but also have aim to exclude side effects from their development.

There was a long term clinical investigation in 1954–1990 years in ten experimental centers (among them clinical data: 50% in USA, 30% in USSR/Russia) that had confirmed the described advantages of proton therapy. These clinical results formed a foundation of quick development proton therapy clinical centers in developed countries in 1990s. These centers are based on oncology and multidisciplinary hospitals and treat 1000 and more patients per year. There are 96 working and 38 constructing PTCs in the world for today. Although we have a lot of experience in proton therapy in Russia, we didn't take part in this new stage. In fact a patient treatment was over in all of three experimental PTCs (Moscow, Dubna, St. Petersburg) up to 2014. Thus we have a delay in a development of proton therapy for 30 years from a world level.

Government of the Russian Federation Decree № 287 of 16<sup>th</sup> March 2020 establishes Program, which has to overcome this delay in development. Main science executor of the Program is National Research Center «Kurchatov Institute», which has an experience, scientific potential and competence for it.

The main aims, stages and objects of the Program are presented.

**Keywords:** *proton beam therapy (PBT), synchrotron, PBT clinical center, prospects*

**For citation:** Ivanov EM, Klenov GI, Maksimov VI, Khoroshkov VS, Chernykh AN. Prospects for the Development of Proton Therapy in Russian. *Medical Radiology and Radiation Safety.* 2022;67(3):41–46. (In Russian). DOI:10.33266/1024-6177-2022-67-3-41-46

## Введение

Сегодня общепризнано, что протонная лучевая терапия (ПЛТ) является наиболее эффективным методом дистанционной лучевой терапии. История развития и современное состояние ПЛТ подробно изложены в [1]. Здесь мы представим лишь краткую информацию, подтверждающую крайнюю необходимость выполнения программы, показанной в заглавии статьи, и наличие в стране всех условий для ее выполнения – физико-технический и клинический опыт ПЛТ, научный и кадровый потенциал, промышленный потенциал высокотехнологичных российских предприятий.

Развитие ПЛТ проходило достаточно сложно и потребовало десятилетий упорных усилий исследователей-клиницистов и медицинских физиков. Быстрому внедрению с 1990 г. в общемировое практическое здравоохранение предшествовал длительный – с 1954 по 1990 гг., – экспериментальный этап, когда исследования проводились в десяти экспериментальных центрах ПЛТ Западной Европы, России, США, Японии в физических институтах с использованием существующих немедицинских ускорителей. Вклад российских исследователей в проблему в этот период неоспоримо велик. Достаточно сказать, что к 1990 г. (к моменту ввода в строй первого в мире клинического многокабинного Центра ПЛТ в многопрофильном госпитале в США в г. Лома-Линда) в США с 1954 г. было накоплено 50 % клинического опыта, в России с 1968 г. в трех экспериментальных центрах ПЛТ в городах Дубне, Москве, Гатчине – 30 % клинического опыта [2].

Сегодня по разным оценкам ПЛТ показана 15–20 % онкологических больных. В мире функционирует 96 клинических центров протонной терапии, сооружается со сроком ввода в эксплуатацию до 2025 г. еще 38 центров. ПЛТ получили в мире к 2021 г. более 250 тыс. больных. Число центров ПЛТ и количество леченых больных быстро растет [3]. К 2032 г. прогнозируется ввод в строй не менее 300 центров ПЛТ. Целевым постоянно декларируемым показателем национальных программ здравоохранения в развитых странах является на ближайшие годы либо сооружение одного клинического центра ПЛТ на 10 млн человек, либо сооружение одного клинического центра ПЛТ на регион – штат, префектура, город-миллионник и т.п. В США (численность населения 325 млн человек) функционирует 41 центр и в Японии (численность населения 125 млн чел.) – 18 центров эти показатели уже достигнуты. Тем не менее, сооружение этих центров продолжается, поскольку как показывает общемировая практика, сфера применения ПЛТ постоянно расширяется.

К сожалению, в России, обладающей к 1990 г. вторым в мире (после США) опытом и потенциалом в проблеме, с конца прошлого века началась стагнация развития этого направления. Лечение больных в трех экспериментальных центрах ПЛТ в XXI веке последовательно, центр за центром прекращалось и в 2014 г. было окончательно остановлено. В России, где по самым скромным оценкам необходимо соорудить 15 крупных клинических центров ПЛТ, «оптимизаторы» здравоохранения

пресекали любые попытки создания современной отечественной техники и технологий ПЛТ. Останавливались вышедшие уже на этап изготовления оборудования проекты [4].

Сегодня в России функционируют лишь два современных центра ПЛТ в городах Димитровграде и С. Петербурге, оба зарубежного производства. В медицинском радиологическом центре им. А.Ф. Цыба работает отечественный комплекс ПЛТ, использующий технологии XX века. Российское здравоохранение на 30 лет отстало от всего мира в оснащении средствами ПЛТ и остро нуждается в создании и тиражировании отечественных технических средств и технологий этого современного и эффективного метода дистанционной лучевой терапии. Все предпосылки – клинический опыт ПЛТ более 7 тыс. больных, опыт создания нескольких поколений оборудования ПЛТ, научный и промышленный потенциал, – для решения этой важнейшей социальной задачи в стране имеются.

## Постановка задачи

На рис. 1 показана схема современного многокабинного центра ПЛТ. Она типична для большинства сооруженных и сооружаемых центров ПЛТ в крупных онкологических и многопрофильных госпиталях. Подобные центры ПЛТ предназначены для лечения до 1 тыс. и более больных в год в зависимости от числа процедурных кабин.<sup>1</sup> В состав центра входят три крупных элемента оборудования: ускоритель (циклотрон или синхротрон) с трактами транспортировки протонного пучка к процедурным кабинам и два типа лучевых установок – гантри для многопольного ротационного облучения лежащего больного и лучевая установка для облучения больного в положении сидя мононаправленным горизонтальным пучком. Число и тип лучевых установок в зависимости от местных условий и требований заказчика может варьироваться.

На гантри облучается основной поток больных со злокачественными новообразованиями (ЗН) любых локализаций. Лучевая установка второго типа используется для ПЛТ больных со ЗН глаза, орбиты и некоторых ЗН головы и шеи. Стоит отметить, что гантри является основным инструментом современной ПЛТ, и с 1990 г. центры ПЛТ без гантри практически не сооружаются. Кроме этих крупных элементов оборудования, разрабатываемых компанией – поставщиком центра, в состав центра ПЛТ входит инфраструктура, свойственная современным лучевым отделениям: широкий спектр аппаратуры для предлучевой топометрии (цифровой рентген, КТ, МРТ, УЗИ и т.п.); развитые информационные технологии (ИТ), включая программное обеспечение (ПО); медицинская аппаратура, обеспечивающая работу медперсонала и т.п. Клинический центр ПЛТ размещается, как правило, в отдельном корпусе площадью от 3000 до 4500 кв.м в зависимости от числа процедурных кабин (лучевых установок).

<sup>1</sup> С 2006 г. для оснащения малых и средних госпиталей и радиологических отделений стали поставляться однокабинные комплексы ПЛТ – один ускоритель и одна лучевая установка.

Таким образом, для создания и тиражирования отечественных центров ПЛТ необходимо разработать и изготовить три основных элемента центра (ускорительная часть и два типа лучевых установок). Инфраструктура центра частично закупается (например, топометрическая аппаратура и часть ИТ) и адаптируется к задачам ПЛТ, частично должна быть разработана самостоятельно. После монтажа и наладки всего оборудования должны быть выполнены комплексные технические и клинические (на ограниченном контингенте больных) испытания, проведены сертификация опытного образца Центра ПЛТ как медицинского изделия и подготовка его к тиражированию.

Для осуществления всего перечисленного необходимо организовать коллектив предприятий для конструирования и изготовления указанных выше трех основных элементов оборудования и создать физико-техническую исследовательскую базу для руководства разработкой, а после – изготовления опытного образца типового клинического центра ПЛТ для его размещения, комплексной наладки, технических и клинических испытаний, сертификации и подготовки к тиражированию. Кроме того, абсолютно необходимо до конструирования оборудования (или одновременно, но опережающими темпами) выполнить моделирование критических и/или инновационных узлов оборудования, чтобы избежать ошибок при конструировании и изготовлении штатного оборудования. История ПЛТ содержит много примеров, когда пренебрежение этими важнейшими этапами разработки – предпроектным моделированием и комплексной наладкой опытного экземпляра клинического центра ПЛТ до его размещения в госпитале, – приводило к громадным денежным потерям (вплоть до банкротства компании – изготовителя) и к многолетним задержкам ввода в эксплуатацию уже сооруженных в госпиталях центрах ПЛТ. Кстати, история Центра ПЛТ, показанного на рис. 1, именно такова. Компания – изготовитель Accel обанкротилась, а пуск Центра с трехлетней (!) задержкой был осуществлен компанией Varian, которой были переданы права на Центр. Этих рисков необходимо избежать.

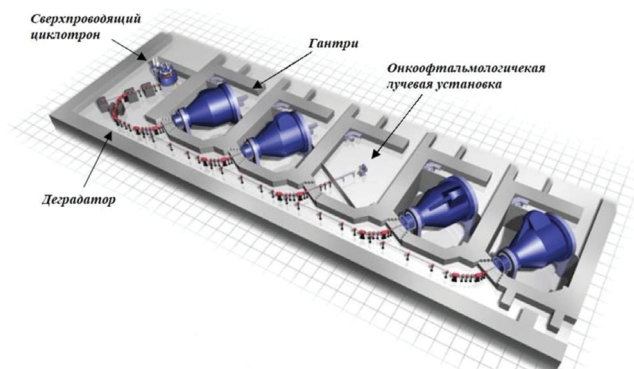


Рис. 1. Макет первого этажа клинического центра ПЛТ фирмы Accel – Varian, г. Мюнхен, Германия. Слева циклотрон; правее пять лучевых установок – четыре гантри и установка на горизонтальном протонном пучке

Fig. 1. The layout of the building of the Rinecker Proton Therapy Center in Munich, Germany (Varian -ACCEL): left – a synchrotron, right – four gantries and an installation beam for a horizontal proton beam

Создание необходимой физико-технической испытательной базы (исследовательского Комплекса ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт») также определено упомянутым постановлением Правительства РФ и абсолютно необходимо как для успешного выполнения обсуждаемой программы, так и для дальнейшего многолетнего развития проблемы.

Ниже мы покажем достаточность российского научного и промышленного потенциала для выполнения программы и рассмотрим структуру и функции необходимой физико-технической исследовательской базы ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт».

### Компетенции, накопительный опыт ПЛТ и российский промышленный потенциал

Основной российский опыт ПЛТ накоплен в институтах НИЦ «Курчатовский институт». Наряду с разработкой нескольких поколений оборудования для ПЛТ, серьезное внимание уделялось поиску новых подходов к лечению. В центрах ПЛТ институтов НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и ПИЯФ, семь крупнейших клиник Москвы и С. Петербурга провели с 1969 г. ПЛТ 5700 больных, что составляет более 80 % российского клинического опыта. Все лечение осуществлялось на отечественном оборудовании. Использовались размещенные в радиационно-защищенных каньонах пять специализированных по локализациям ЗН лучевых установок – четыре в ИТЭФ и одна в ПИЯФ. Все эти годы аппаратура и технологии совершенствовались и/или сменялись новыми. Так, в ИТЭФ были разработаны, изготовлены и прошли клиническую апробацию три поколения лучевых установок. После прекращения лечения (в 2012 г. в ИТЭФ и в 2014 г. в ПИЯФ) все усилия исследователей были направлены на разработку новых методов, технологий и аппаратуры, в том числе для лечения онкоофтальмологических больных. Результаты начали активно использоваться в 2017 г., когда был инициирован проект онкоофтальмологического комплекса ПЛТ на циклотроне ПИЯФ. Проект доведен до стадии рабочего проектирования, и с 2020 г. продолжается уже в рамках упомянутого в аннотации постановления Правительства РФ.

В 2012 г. под руководством ИТЭФ 15 российских предприятий завершили проект первого в стране клинического Центра ПЛТ при ГКБ им. С.П. Боткина. Проект был доведен до стадии изготовления опытных образцов оборудования, получил положительное заключение Госэкспертизы, но, как уже отмечалось, был остановлен.

С 1965 г. учеными ИТЭФ и ПИЯФ были опубликованы около 200 научных работ по тематике ПЛТ, в т.ч. три учебных пособия МГУ им. М.В. Ломоносова. Были защищены одна докторская и шесть кандидатских диссертаций по тематике ПЛТ. Сегодня два коллектива насчитывают 29 специалистов, в т.ч. – три доктора и шесть кандидатов наук. В последние годы коллективы сильно помолодели – 40 % сотрудников моложе 40 лет. Очень важно, что целый ряд специалистов имеет многолетний опыт разработки оборудования для ПЛТ и опыт физико-технического сопровождения лечения сотен больных в составе бригад врач – медицинский физик.

За десятилетия исследований и выполнения новых проектов ИТЭФ и ПИЯФ привлекли к сотрудничеству целый ряд крупных институтов и промышленных предприятий страны. В их числе – Московский радиотехнический институт РАН, Научный исследовательский институт электро-физической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, Ивановский завод тяжелого станкостроения, АОО КБ Кунцево, группа компаний Гаммамед, Спецпроект. Все эти организации выразили готовность участвовать в выполнении обсуждаемой программы.

Можно констатировать, что опыт и научный потенциал НИЦ «Курчатовский институт» и промышленный потенциал привлекаемых российских предприятий уверено обеспечат выполнение поставленной задачи – разработку и создание современного типового клинического центра ПЛТ.

**Физико-техническая исследовательская база ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт»**

База размещается на трех площадках институтов НИЦ «Курчатовский институт» и включает три объекта: Комплекс ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт», экспериментальный Центр ПЛТ ИТЭФ и онкофтальмологический комплекс ПЛТ ПИЯФ.

**Комплекс ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт»** должен быть размещен в отдельно стоящем корпусе общей площадью 3500 кв. м. (рис. 2). Корпус оснащается тремя основными разрабатываемыми элементами оборудования клинического центра ПЛТ – ускоритель (синхротрон на энергию пучка до 250 МэВ) с каналами транспортировки протонных пучков в два процедурных помещения, лучевая установка для многопольного облучения пациента гантри и лучевая установка на мононаправленном горизонтальном пучке. В корпусе также размещаются вся инфраструктура, свойственная современному лучевому отделению – топометрическая аппаратура, смотровые, кабинеты врачей и комнаты персонала, необходимые для наладки аппаратуры и технологий лаборатории и небольшие мастерские. Именно в этом корпусе после изготовления разрабатываемого оборудования, закупки коммерческого оборудования и монтажа будет осуществляться его комплексная наладка, неизбежная доработка, клинические и технические испытания, сертификация и подготовка к тиражированию опытного образца типового клинического центра ПЛТ. Следует отметить, что все необходимое и достаточное оборудование типового клинического центра ПЛТ в этом опытном образце предусмотрено, но состав тиражируемых центров ПЛТ, в зависимости от требований и масштаба клиники, ее специализации и проектного потока больных может варьироваться. Возможен разумный выбор числа и типов лучевых установок, инфраструктуры, дооснащения существующего в клинике радиологического отделения дополнительной аппаратурой и т. п.

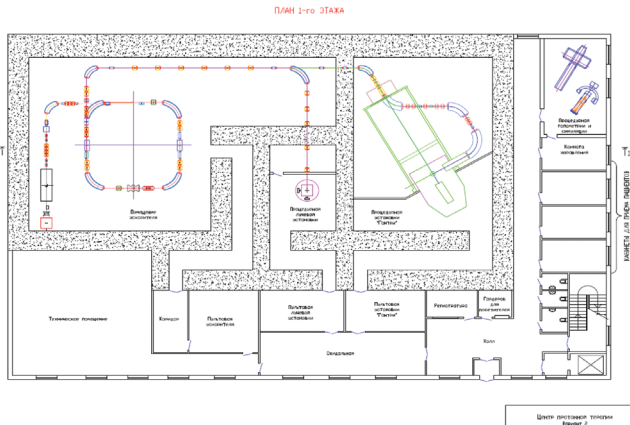


Рис. 2. План первого этажа Комплекса ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт». Слева – синхротрон на энергию 70 – 250 МэВ, правее – лучевая установка на горизонтальном пучке и установка гантри. Здесь же размещены пульты и часть инфраструктуры, необходимой для подготовки больного и облучения. Остальная инфраструктура, технологические мастерские, лаборатории, персонал и т.п. размещены на втором и третьем этажах корпуса

Fig. 2. General view of the first floor Center for Proton Therapy NRC «Kurchatov Institute»: left – synchrotron 70 – 250 MeV, an installation beam for a horizontal proton beam and a gantry, also there are control rooms and equipment that was used for stages before and during irradiation of patient. There are other auxiliary equipments and rooms for personals on the second and third floors of Center

Оборудование и технологии ПЛТ в последние три десятилетия во всем мире постоянно совершенствуются, предлагаются и отрабатываются новые, зачастую прин-

ципальные 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 – для разработки и испытаний новых аппаратных средств и технологий ПЛТ и для подготовки кадров.

**Экспериментальный Центр ПЛТ ИТЭФ** функционирует с 1969 г. [2, 3]. Он размещен в отдельном корпусе площадью 2500 кв.м и оснащен тремя процедурными кабинетами с четырьмя специализированными по локализациям опухолей лучевыми установками. Одна из них показана на рис. 3. Здесь были разработаны и последовательно введены в эксплуатацию три поколения этих лучевых установок. Шесть крупнейших клиник Москвы провели в Центре ПЛТ ИТЭФ с 1969 по 2012 гг. лечение 4320 онкологических больных с различно локализованными злокачественными новообразованиями – голова, шея, опухоли глаза и орбиты, опухоли шейки матки, простаты и т.п. В 2012 г. в связи с аварией ускорителя лечение больных было прекращено. Все четыре лучевые установки Центра ПЛТ ИТЭФ при аварии не пострадали.



Рис. 3. Одна из четырех лучевых установок экспериментального Центра ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ, где с 1969 г. проведена ПЛТ 4320 больным

Fig. 3. There is a one of the four experimental beam installations in Center for Proton Therapy NRC «Kurchatov Institute» – ИТЭФ, where proton therapy since 1969 was done for 4320 patients

С 2012 г. исследования, ведущиеся в Центре ПЛТ ИТЭФ, были направлены, как уже отмечалось, на разработку новых аппаратных средств и технологий ПЛТ. Новые узлы оборудования изготавливались и монтировались на лучевых установках, используемых в качестве испытательных стендов. Исследовались новые технологии и методики ПЛТ, определялась их пригодность и эффективность. Особое внимание было уделено разработке новых методов облучения внутриглазных опухолей [5,6,7,8]. Эти результаты успешно используются при разработке онкофтальмологического комплекса ПЛТ ПИЯФ (см. ниже). Подобное предпроектное моделирование необходимо выполнить на действующем оборудовании Центра ПЛТ ИТЭФ для всего спектра инновационных аппаратных узлов и технологий, разрабатываемых для опытного образца типового клинического центра ПЛТ.

**Онкофтальмологический комплекс ПЛТ ПИЯФ** с 2017 г. разрабатывается совместно ПИЯФ и ИТЭФ за счет внутренних резервов ПИЯФ [9]. Постановле-

ние Правительства РФ предусматривает продолжение разработки (модернизацию комплекса) в период 2020–2027 гг. Комплекс (рис. 4) базируется на циклотроне Ц 80 ПИЯФ, размещенном в отдельном радиационно-защищенном зале (выше плана рис. 4, и на рисунке не показан). Циклотрон генерирует пучок протонов с энергией 70 МэВ с глубиной пробега частиц около 4 см в мягкой ткани, что достаточно для облучения опухолей глаза и орбиты. Проектный годовой поток – 400 больных. Комплекс достаточен для лечения всех профильных больных Северо-Западного региона РФ и частично – других регионов страны.

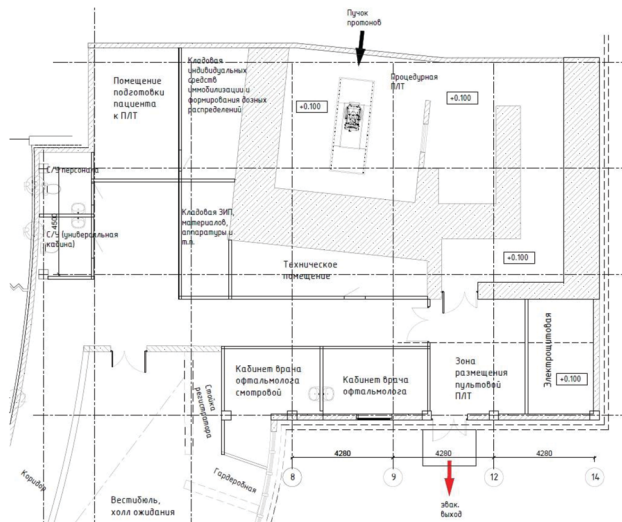


Рис. 4. План размещения оборудования и персонала онкоофтальмологического комплекса НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Fig. 4. General view of the placement equipments and personals for Ophthalmic Oncology Center NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

Кроме того, планируется адаптировать лучевую установку комплекса ПИЯФ к использованию на пучке с энергией 250 МэВ типового клинического центра ПЛТ. Использование пучка высокой энергии синхротрона кардинально расширит сферу клинического применения этой лучевой установки. Она будет размещена в комплексе ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт» в качестве лучевой установки на мононаправленном горизонтальном пучке опытного образца типового клинического центра ПЛТ, а затем тиражироваться наряду с лучевой установкой гантри.

Можно утверждать, что предполагаемая исследовательская физико-техническая база, включающая три эле-

мента – комплекс ПЛТ НИЦ «Курчатовский институт», экспериментальный центр ПЛТ ИТЭФ и онкоофтальмологический комплекс ПИЯФ, – обеспечит возможность разработки, наладки, испытаний, сертификации и подготовки к тиражированию опытного образца типового клинического центра ПЛТ.

**Выводы**

1. Протонная лучевая терапия (ПЛТ) является наиболее современным и эффективным методом дистанционной лучевой терапии онкологических больных с различно локализованными злокачественными новообразованиями; ПЛТ показана 15–20 % онкологических больных.
2. В развитых странах с 1990 г. создана сеть клинических центров ПЛТ с готовым потоком 1 тыс. и более больных в каждом центре; сегодня в мире функционирует 96 подобных центров и их число быстро растет.
3. В России, где минимальная потребность здравоохранения уже сегодня составляет 15 % ПЛТ, функционируют лишь два центра – оба зарубежного производства; российская промышленность подобной техники не выпускает.
4. В России максимальный физико-технический и клинический опыт (более 80 % всех получивших в стране ПЛТ больных), научный и кадровый потенциал и компетенции сосредоточены в институтах НИЦ «Курчатовский институт» – ИТЭФ и ПИЯФ; в постановлении Правительства НИЦ «Курчатовский институт» определен головной научной организации по выполнению программ.
5. Российские высокотехнологичные предприятия обладают необходимым промышленным потенциалом для производства современной техники ПЛТ; их состоятельность доказана успешным участием в уже выполненных подобных проектах институтов НИЦ «Курчатовский институт».
6. В постановлении Правительства РФ от 16 марта 2020 г. № 287 предусмотрена Программа разработки, изготовления, сертификации и подготовки к тиражированию в период 2020–2027 гг. опытного образца типового клинического центра ПЛТ и создание онкоофтальмологического комплекса ПИЯФ.
7. НИЦ «Курчатовский институт» приступил к выполнению Программы; при успешном развитии работ тиражирование типовых клинических центров ПЛТ может быть начато в 2027 г.; в этом же году планируется ввод в строй онкоофтальмологического комплекса ПИЯФ.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES**

1. Хорошков В.С. История и перспективы протонной терапии // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т.64, № 2. С. 52-60. [Khoroshkov VS. History and Prospects of Proton Therapy. Medical Radiology and Radiation Safety. 2019;64;2:52-60 (In Russ.)]. DOI: 10.12737/article\_5ca5fc2765c9f5.02525917.
2. WWW.PTCOG (Proton Therapy Co-Operative Group), Particles Newsletters, 1990, № 5, p.9.
3. WWW.PTCOG (Particles Therapy Co-Operative Group), Online 2020. The video streams of the meeting (Track 1 to 4)
4. Карпунин В.О., Кленов Г.И., Хорошков В.С. Первый в России специализированный, клинический центр протонной лучевой терапии // Альманах клинической медицины. 2008. № 17-1. С. 316-319. [Karpunin VO, Klenov GI, Khoroshkov VS. Russia's First Specialized Clinical Center for Proton Beam Therapy. Almanac of Clinical Medicine (In Russ.)].
5. Ломанов М.Ф., Ерохин И.Н., Канчели И.Н., Орлов Д.Г., Рудской И.В. Разработка метода планирования протонного облучения внутриглазных новообразований // Медицинская физика. 2012. № 4. С. 43–51. [Lomanov MF, Erokhin IN, Kancheli IN, Orlov DG, Roudskoy IV. Development of Treatment Planning Methods for Proton Irradiation of Intraocular Neoplasms. Medical Physics. 2012;№ 4:43–51. (In Russ.)].
6. Орлов Д.Г., Владимирова О.М., Ерохин И.Н., Ломанов М.Ф., Саакян С.В., Вальский В.В. и др. Представление модели глаза для использования в системе дозно-анатомического планирования лучевой протонной терапии внутриглазных новообразований // Российский офтальмологический журнал. 2013. Т.6, № 4. С. 48-54. [Orlov DG, Vladimirova OM, Erokhin IN, Lomanov MF, Saakyan SV, Val-

- sky VV, et al. Presenting an eye model for the application in dosage and anatomic planning for proton therapy of intraocular tumors. *Russian Ophthalmological Journal*. 2013;6(4):48-54. (In Russ.).
7. Бородин Ю.И., Вальский В.В., Ерохин И.Н., Канчели И.Н., Ломанов М.Ф., Люлевич В.И. и др. Инновационные разработки технических средств для протонной терапии внутриглазных новообразований. Часть I // Российский офтальмологический журнал. 2015. Т.8, № 2. С. 14-20. [Borodin YuI, Valsky VV, Erokhin IN, Kancheli I.N, Lomanov MF, et al. Technical innovations for proton therapy of intraocular neoplasms. Part I. *Russian Ophthalmological Journal*. 2015;8;2:14-20. (In Russ.)].
8. Бородин Ю.И., Вальский В.В., Ерохин И.Н., Канчели И.Н., Ломанов М.Ф., Люлевич В.И. и др. Инновационные разработки технических средств для протонной терапии внутриглазных новообразований. Часть II // Российский офтальмологический журнал. 2016. Т.9, № 2. С. 11-17. [Borodin YuI, Valsky VV, Erokhin IN, Kancheli IN, Lomanov MF, Lyulevich VI, et al. Technical Innovations for Proton Therapy of Intraocular Neoplasms. Part II. *Russian Ophthalmological Journal*. 2016;9;2:11-17. (In Russ.)].
9. Минкин Д.Ю., Максимов В.И., Иванов Е.М., Хорошков В.С., Кленов Г.И., Черных А.Н. Онкоофтальмологический комплекс в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ. Исследования и практика в медицине. 2018. Т.5, № 52. С. 181. [Minkin DYU, Maksimov VI, Ivanov EM, Khoroshcov VS, Klenov GI, Chernykh AN. Onco-Ophthalmologic Complex in NRC “Kurchatov Institute” – PNPI. *Research'n Practical Medicine Journal*. 2018;5;52:181. (In Russ.)].

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (приказ от 28.10.2021 г. № 2751).

**Участие авторов.** Статья подготовлена с равным участием авторов. Авторы благодарят Д.Г. Орлова за полезные обсуждения и замечания.

**Поступила:** 17.01.2022. Принята к публикации: 15.03.2022.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.

**Financing.** The work was supported by the National Research Center «Kurchatov institute» (order dated October 28, 2021 No. 2751).

**Contribution.** Article was prepared with equal participation of the authors.

**Article received:** 17.01.2022. Accepted for publication: 15.03.2022.