

УДК 615.47

КОМПЛЕКС ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ НА СЦ-1000. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПРИВЕДЕНИЕ К СОВРЕМЕННЫМ СТАНДАРТАМ ВМП

© 2021 г. Д. С. Брожик^а, *, О. М. Жидкова^а, Е. М. Иванов^а, Д. Л. Карлин^а, Н. А. Кузора^а, В. И. Максимов^а, Н. И. Мамедова^а, Ф. А. Пак^а, А. И. Халиков^а

^аПетербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова Национального исследовательского центра “Курчатовский институт”,
мкр. Орлова роща 1, Гатчина, Ленинградская обл., 188300 Россия

*e-mail: brozhik_ds@pnpi.nrcki.ru

Поступила в редакцию 25.09.2020 г.

После доработки 15.12.2020 г.

Принята к публикации 21.12.2020 г.

Статья посвящена установке протонной стереотаксической терапии (далее – УПСТ) на базе синхротрона СЦ-1000 Петербургского института ядерной физики. При реализации УПСТ был внедрен метод облучения “напролет”, заключающийся в воздействии на внутричерепные мишени горизонтальным пучком протонов с энергией 1000 МэВ в комбинации с подвижной техникой облучения [1, 2]. Особое внимание обращается на модернизацию УПСТ и приведение к современным стандартам высокотехнологичной медицинской помощи (ВМП). В статье дана характеристика дизайн-проекта терапевтического стола для протонной терапии [3]. Рассмотрены особенности разработанной программы управления лечебной установкой с функцией контроля параметров протонного пучка, позволяющей точно выполнять позиционирование, а также отрабатывать динамическое перемещение составных частей УПСТ для исполнения сложных планов облучения. Выяснено, что вследствие уникальности методики облучения пучком протонов с энергией 1000 МэВ требуется разработать систему трехмерного планирования протонной лучевой терапии для моделирования условий облучения и расчета дозовых распределений, а также подбора оптимального плана облучения с учетом рисков для здоровых тканей. Также необходимо разработать систему верификации планов облучения для обеспечения гарантии качества протонной стереотаксической терапии.

Ключевые слова: протонная терапия, система дозиметрического планирования, терапевтический стол, программа управления

DOI: 10.56304/S2079562920060135

ВВЕДЕНИЕ

В Ленинградском институте ядерной физики (сейчас НИЦ “Курчатовский институт”–ПИЯФ), совместно с Центральным научным исследовательским рентгенорадиологическим институтом (сейчас “Российский научный центр радиологии и хирургических технологий им. А.М. Гранова”), начиная с 1973 г., велись работы по исследованию возможности применения в медицинских целях, генерируемого синхротроном СЦ-1000 пучка протонов энергией 1000 МэВ. Был разработан и внедрен метод облучения “напролет”, особенность которого заключается в применении горизонтального пучка с энергией 1000 МэВ в сочетании с подвижной техникой облучения [1]. Разработанный метод оказался эффективным как при лечении различных заболеваний головного мозга, таких как аденомы гипофиза, артериовенозные мальформации, так и при паллиативном облучении

аденогипофиза при гормонозависимых формах рака.

Основное преимущество данного метода состоит в возможности формирования дозовых полей малого размера с очень высоким краевым градиентом, что позволяет концентрировать поглощенную дозу в опухоли при минимальных радиационных нагрузках на окружающие ткани. Во время облучения пациент находится на установке для протонной стереотаксической терапии, состоящей из лечебного стола, прибора-фиксатора головы и рентгеновского центратора. Подвижная техника облучения осуществляется за счет вращения лечебного стола вокруг вертикальной оси (Z), проходящей через изокентр установки, на $\pm 40^\circ$, маятниковых движений прибор-фиксатора головы на угол до $\pm 36^\circ$ вокруг горизонтальной оси (X), перпендикулярной оси пучка (Y). Рентгеновский центратор используется для правильной укладки

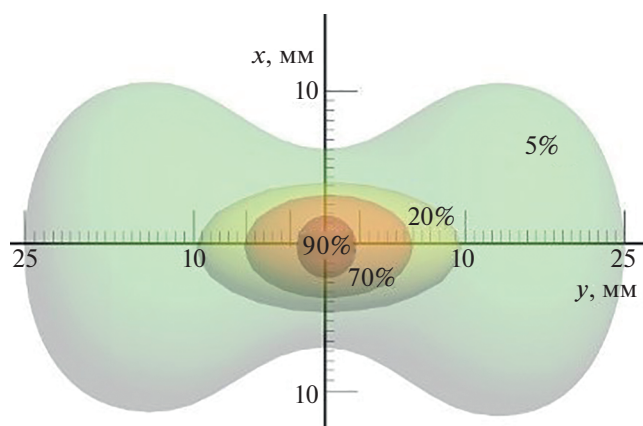


Рис. 1. Распределение дозы в мишени при подвижном облучении.

головы пациента и наведения центра мишени с изоцентром установки.

Дозные поля, характерные для данной методики облучения, характеризуются резко выраженным максимумом поглощенной дозы в центре. Соотношение дозы в очаге к дозе на поверхности составляет, примерно, 200 : 1. Изодозы от 90 до 30% имеют

форму, близкую к форме эллипса, а при более низких значениях — форму крыльев бабочки (рис. 1).

С апреля 1975 года по май 2013 года было пролечено около 1400 пациентов.

В связи с износом некоторых частей оборудования, выходом из строя приборов по сроку службы, а также введением более жестких, в том числе и международных [4], технических требований к аппаратуре для лучевой терапии в настоящее время проводится модернизация УПСТ для дальнейшего возобновления лечения пациентов.

РЕНТГЕНОВСКИЙ ЦЕНТРАТОР

Рентгеновский центратор — рентгеновская трубка с детектором, предназначенная для центрирования внутричерепной мишени на ось протонного пучка. Была проведена замена электрооптического преобразователя, основной части центратора на плоскочувствительный цифровой детектор (рис. 2).

К основным преимуществам данного оборудования относятся: высокое пространственное разрешение, большой динамический диапазон, высокая стойкость к прямому рентгеновскому излучению, отсутствие пространственных искажений, отсутствие чувствительности к магнитным по-

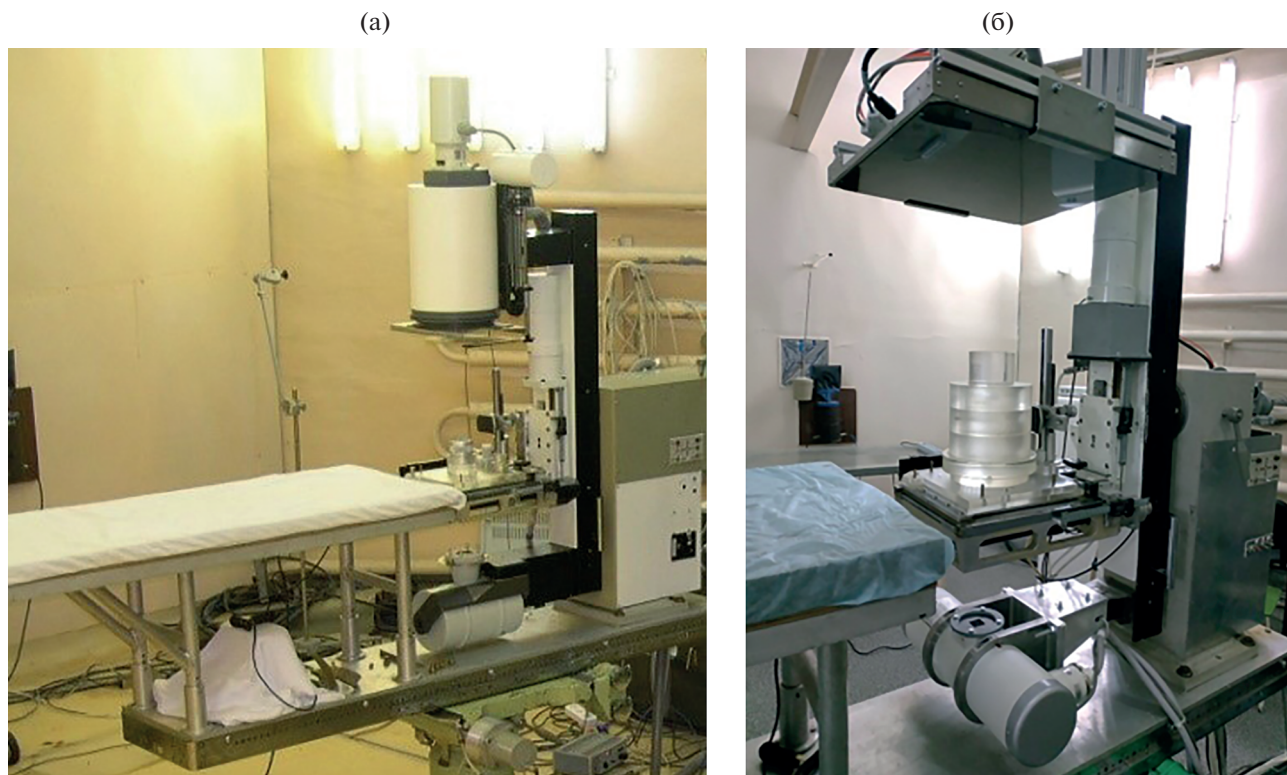


Рис. 2. Рентгеновский центратор до (а) и после модернизации (б).



Рис. 3. Автоматизированное рабочее место оператора и врача.

лям, дистанционное управление, уменьшение радиационной нагрузки на персонал и пациентов.

Организовано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора для контроля системы управления установкой и АРМ врача для работы с результатами диагностических исследований пациента на КТ и МРТ (рис. 3). Цифровой формат полученных изображений можно подвергнуть дополнительной компьютерной обработке, результаты исследований сохраняются в системе.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ

При реализации планов облучения для управления лечебной установкой и одновременного контроля параметров протонного пучка создано программное обеспечение. Разработанный программный продукт обеспечивает дополнительные возможности оперативного реагирования на любые изменения параметров облучения и способствует стандартизации протоколов лечения. Программа выполнена в среде программирования LabWindows™/CVIANSIC. Автоматизированная система управления позволяет точно позиционировать исполнительные механизмы. Оператор может наблюдать за заданными параметрами во время процесса облучения: количество проходов стола и прибора-фиксатора и текущее положение угла отклонения; параметры пучка; данные, полученные с мониторных камер (данное нововведение позволило уйти от частотомеров и

проводить работы на одной рабочей станции). Все характеристики пучка контролируются программой в автоматическом режиме для обеспечения безопасности пациента. Программа защищена от стороннего использования логином и паролем. На рис. 4 представлен интерфейс программы.

СИСТЕМА ДОЗИМЕТРИЧЕСКОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Система планирования протонной лучевой терапии с энергией пучка 1000 МэВ злокачественных и доброкачественных новообразований служит для моделирования и расчета дозовых распределений внутри области интереса: подбор углов поворота и количество проходов деки лечебного стола и прибора-фиксатора головы, а также время облучения в каждом конкретном случае. Главным критерием выбора оптимального плана облучения является покрытие объема РТV (Planning Target Volume) 95% изодозой и минимизация побочных эффектов в здоровых тканях. Главными особенностями разрабатываемой системы планирования являются: реконструкция трехмерной модели тела по исходному набору топометрических данных, оконтуривание объемов мишеней и органов риска, трехмерное дозовое распределение, рассчитанное с помощью компьютерного моделирования в восстановленной 3D геометрии, с наложением на анатомические изображения.

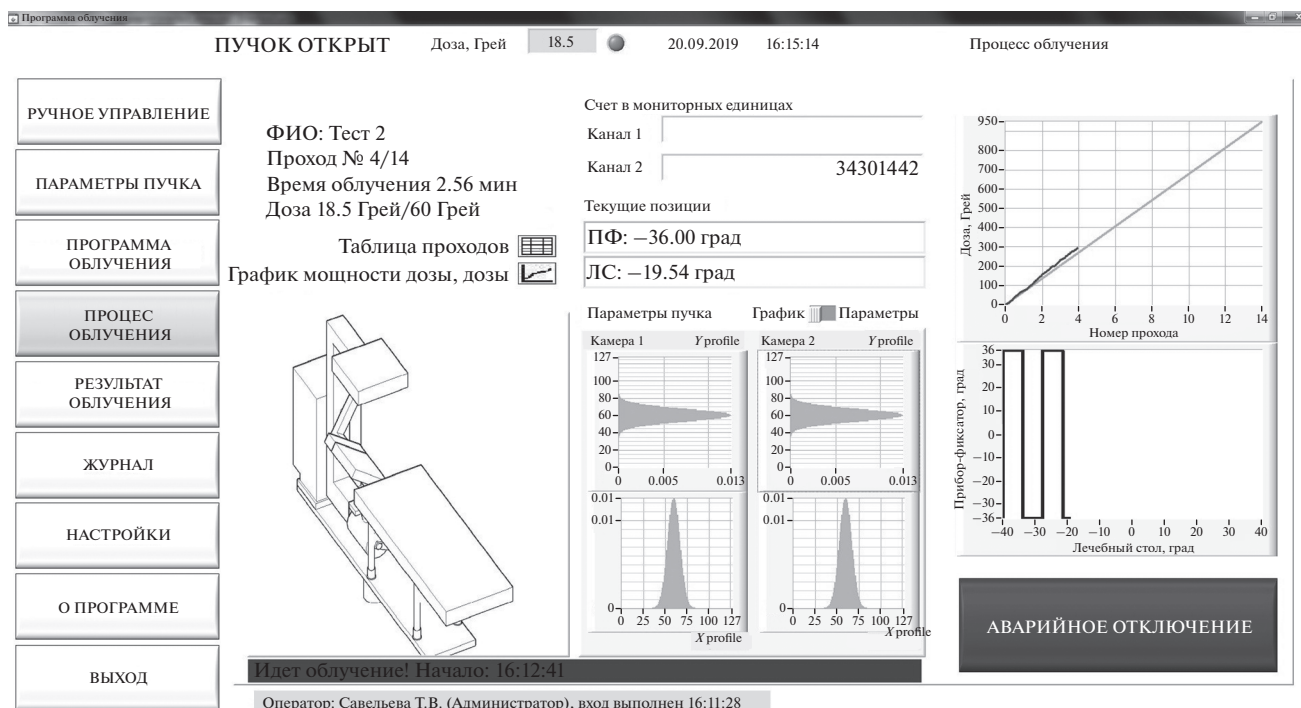


Рис. 4. Интерфейс программы автоматизированной системы управления.

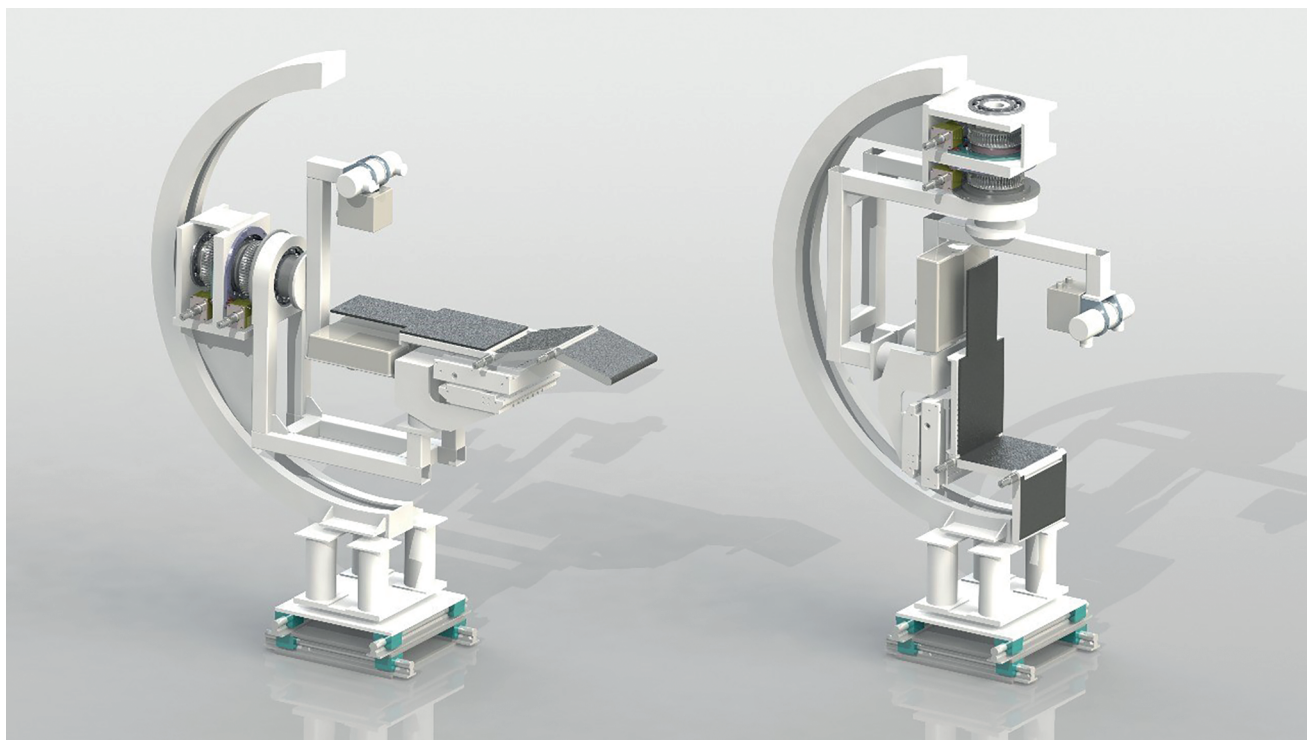


Рис. 5. Дизайн-проект роботизированного терапевтического стола для позиционирования пациента.

СИСТЕМА ВЕРИФИКАЦИИ

Верификация планов облучения, наряду с периодической проверкой терапевтической аппаратуры, является одной из важнейших процедур гарантии качества лучевой терапии. Этап верификации позволяет быть уверенным в точной реализации индивидуальных планов облучения. Основные цели, которые преследуются при проведении верификации: выявление и минимизация эффектов возникновения ошибок при расчете дозового распределения; минимизация погрешностей во время использования ускорителя; определение пределов возможностей модели и алгоритма расчета дозового распределения.

При верификации проводится гамма-анализ, который заключается в сравнительном анализе теоретических и экспериментальных распределений поглощенной дозы. Теоретические планы рассчитываются с помощью программы (система дозиметрического планирования), а экспериментальные данные получают методом фантомных измерений. В результате определяется γ -индекс, представленный в процентах. Критерием прохождения плана облучения является условие $\gamma > 95\%$.

УСТАНОВКА ДЛЯ ПРОТОННОЙ СТЕРЕОТАКСИЧЕСКОЙ ТЕРАПИИ

В настоящее время возможно проводить облучение только внутричерепных мишеней ввиду конструктивных особенностей УПСТ. Поэтому совместно с АО «Равенство» был разработан дизайн-проект роботизированного терапевтического стола

[2], с помощью которого, вероятно, можно будет расширить нозологическое применение метода протонной терапии «напролет». Конструкторскими особенностями терапевтического стола являются: наличие 8 степеней свободы; возможность крепления средств для иммобилизации пациента; наличие в подголовнике системы рентген-контрастных меток для создания единой системы навигации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На данный момент завершается приведение УПСТ к современным стандартам высокотехнологичной медицинской помощи. Уже выполнена замена механических частей для увеличения точности позиционирования, внедрена программа управления установкой, укомплектован комплекс рентгеновского центратора. Финальными этапами проводимой модернизации УПСТ являются: создание и внедрение систем дозиметрического планирования и верификации планов облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Granov A.M., Tyutin L.A., Shalek R.A., Vinogradov V.M., Karlin D.L. // Med. fizika. 2016. No. 2 (70). P. 10–17.
2. Abrosimov N.K., Vorobyov A.A., Zherbin E.A., Connonov E.A. // Vestnik Akademii Nauk SSSR. 1985. P. 84–91.
3. Granin D.I., Vasilevskaya I.V., Khalikov A.I., Maksimov V.I. // Med. fizika. 2018. No. 4 (80). P. 17–23.
4. IAEA-TECDOC-1040. 1998. Vienna: IAEA.

Proton Therapy Facility Based on the PNPI SC-1000 Synchrocyclotron. Current Status and Bringing to Modern High-Tech Medical Care Standards

D. S. Brozhik¹*, O. M. Zhidkova¹, E. M. Ivanov¹, D. L. Karlin¹, N. A. Kuzora¹, V. I. Maksimov¹, N. I. Mamedova¹, F. A. Pak¹, and A. I. Khalikov¹

¹Petersburg Nuclear Physics Institute, National Research Center Kurchatov Institute, Gatchina, Leningradskaya oblast, 188300 Russia

*e-mail: brozhik_ds@pnpi.nrcki.ru

Received September 25, 2020; revised December 15, 2020; accepted December 21, 2020

Abstract—The stereotactic proton therapy facility at the SC-1000 synchrocyclotron, Petersburg Nuclear Physics Institute, is described. The "shoot-through" irradiation method is applied: intracranial targets are exposed to a 1000-MeV horizontal proton beam in combination with a rotational irradiation technique. Particular attention is paid to the modernization of the facility and the bringing it to modern high-tech medical care standards. The design project of a proton therapy table is described. The features of the developed software for control of the facility and track the parameters of the proton beam, which allows precise positioning, as well as dynamic movement of components for the implementation of complex irradiation plans are considered. It has been found that a unique irradiation technique requires the development of an unparalleled three-dimensional treatment planning system to simulate the irradiation conditions, calculation of dose distributions, and selection of the optimal irradiation plan taking into account dose-constraints in organs at risk. It is also required to develop A verification system should also be developed to ensure the quality assurance of proton stereotactic therapy.

Keywords: proton therapy, treatment planning system, treatment couch, software for proton therapy