

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСТОЯНСТВА ДОЗИМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

В.А. Киселев^{1,2}, А.М. Демидова^{1,2}, Ю.Д. Удалов¹, А.Н. Колесников²,
С.Е. Гриценко¹, Е.Н. Устимова¹

¹ Федеральний научно-клинический центр медицинской радиологии и онкологии
ФМБА России, Москва

² Димитровградский инженерно-технологический институт – филиал
Национального исследовательского ядерного университета “МИФИ”,
Димитровград

Цель: Определение диапазонов вариабельности дозиметрических параметров системы протонной терапии (ПТ) для уточнения допустимых предельных отклонений.

Материал и методы: Основой для программы гарантии качества (ГК) системы ПТ в ФНКЦРиО ФМБА России является отчет Американской ассоциации физиков в медицине ААРМ TG-224, согласно которому программа ГК представляет собой живой, адаптивный документ, который необходимо уточнять, корректировать и оптимизировать с учетом особенностей используемой системы ПТ и имеющегося дозиметрического оборудования.

После организации проверок в рамках программы ежедневной ГК появилась возможность автоматического сбора данных о дозиметрических параметрах системы ПТ для последующего анализа. Было решено исследовать стабильность во времени некоторых дозиметрических параметров системы ПТ для определения диапазонов их изменений, что позволит уточнить допустимые отклонения этих параметров.

Результаты: Исследована стабильность параметров, связанных с постоянством выбора энергии протонного пучка. В результате исследования установлено, что значения параметров, связанных с постоянством выбора энергии протонного пучка, варьируют в значительно меньших пределах по сравнению с предложенными в TG-224.

Заключение: Получен результат, который может позволить пересмотреть подход к планированию ПТ в ФНКЦРиО ФМБА России, в частности, к выбору отступов на РТВ. Также нами предложены новые уточненные значения допусков на предельные отклонения анализируемых параметров.

Ключевые слова: *дозиметрические параметры, протонная терапия, ежедневная гарантия качества, ежедневный мониторинг*

DOI: 10.52775/1810-200X-2022-95-3-65-70

Введение

Протонная терапия имеет ряд преимуществ перед традиционно применяемой фотонной терапией из-за различия механизма взаи-

модействия протонов и фотонов с веществом. При распространении в среде квазимоноэнергетических протонов глубинное распределение дозы медленно увеличивается с глубиной, а за-

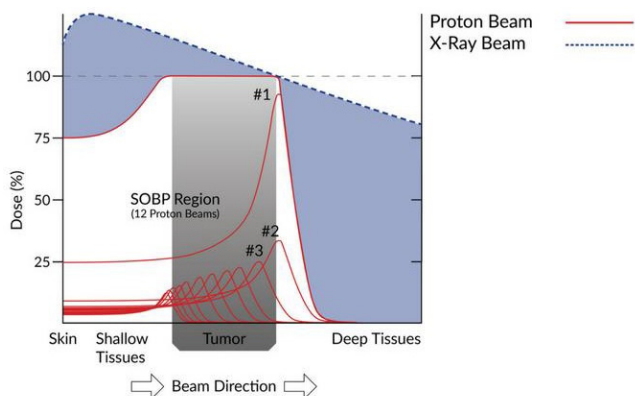


Рис. 1. Сравнение распределения глубинной дозы протонного и фотонного пучков

тем появляется максимум с амплитудой, в 3–4 раза превышающей дозу на поверхности среды. Далее доза быстро падает практически до нуля [1]. Таким образом, большая часть поглощенной дозы протонного излучения сосредоточена в узкой области, называемой пиком Брэгга. Это свойство было признано Робертом Уилсоном в 1946 г. [2] практически идеальным для лучевой терапии, поскольку позволяет направить высокую дозу на патологический очаг, практически не затрагивая окружающие здоровые ткани (рис. 1).

Запуск в 2019 г. в г. Димитровграде центра ПТ на базе ФНКЦРиО ФМБА России ознаменовал собой новый этап развития ПТ в Российской Федерации [3]. Этот центр является уникальным для страны и одним из крупнейших в Европе. Преимуществом центра является то, что на его территории сосредоточены все виды медицинской помощи, в том числе протонная и фотонная терапия, химиотерапия, радионуклидная терапия, радионуклидная и ПЭТ-диагностика, реабилитационное отделение для оказания помощи онкологическим больным в режиме замкнутого цикла.

Перед непосредственным началом клинической эксплуатации [4] был определен перечень параметров для каждого каньона, подлежащих периодическому контролю. Основой программы гарантии качества протонной терапии в настоящее время является отчет рабочей группы TG-224 [5] Американской ассоциации физиков в медицине, однако ведутся работы по адаптации этого документа для нашего центра с учетом характеристики используемого терапевтического и дозиметрического оборудования. Был рассмотрен опыт организации

ежедневного контроля выполнения программы ГК других протонных центров, с целью внедрения оптимального решения [6–11].

Преимущества, обеспечиваемые пиком Брэгга, позволяют более точно распределять дозу, при этом требования к точности позиционирования пациента также возрастают. Неточное позиционирование пациента в случае ПТ приведет к более серьезным ошибкам облучения по сравнению с фотонной терапией [12]. Для нейтрализации этого эффекта используется концепция PTV (планируемый объем облучения). Предполагается, что захват части нормальной ткани, окружающей клинический объем мишени для облучения, обеспечит достаточное покрытие мишени равномерной дозой.

Учитывая, что в Российской Федерации до сих пор нет документов, регламентирующих размеры отступов на PTV при ПТ, мы используем стандартные отступы для фотонной терапии. Целью данной работы является исследование возможностей уточнения и, по возможности, снижения отступа на PTV.

Материал и методы

В протонном центре ФНКЦРиО ФМБА России используется система протонной терапии Proteus Plus производства IBA (Ion Beam Applications, Бельгия). Он состоит из циклотрона C235-V3 [13] и четырех каньонов. Циклотрон производит пучок протонов с максимальной энергией 235 МэВ, который затем поочередно направляется в каньоны.

Два из них (GTR1 и GTR2, лечебные каньоны с гантри) оборудованы гантри, вращающимся на 360°, что позволяет доставлять пучок к мишени с любого направления. Третий каньон (IBTR3, с наклонным пучком) адаптирована к наклонному пучку с двумя возможными фиксированными углами облучения. Четвертый каньон (FSTR4, с малым фиксированным пучком) позволяет облучать офтальмологические новообразования в положении сидя.

Для обеспечения безопасности процесса ПТ была разработана программа ГК. Поскольку проверки, проводимые ежедневно, занимают наибольшее время в среднем за год, мы уделяем наибольшее внимание их оптимизации [10].

В настоящее время мы используем комплекс средств для утренних проверок, состоящий из сцинтилляционного детектора Lynx PT

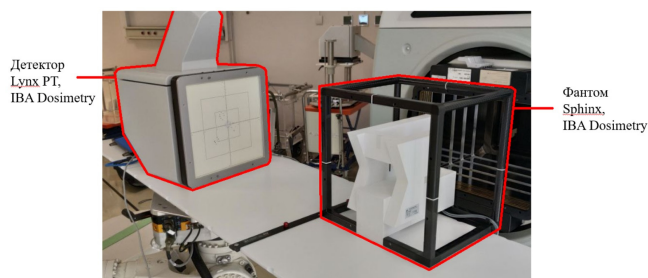


Рис. 2. Комплекс для утренних проверок, общий вид

и фантома Sphinx (IBA Dosimetry), управляемого с помощью программного обеспечения MuQA (рис. 2). Полученные с его помощью изображения можно анализировать сразу после окончания измерений в автоматическом режиме. Результаты измерений хранятся в единой базе данных, что облегчает их ретроспективный анализ.

После многих месяцев работы было принято решение проанализировать стабильность системы выбора энергии. Если дозиметрический параметр достаточно стабилен, значения допустимых отклонений могут быть пересмотрены. Для анализа был выбран период в 1 год, исследованы параметры лечебного каньона GTR1.

Проводили анализ постоянства выбора одной из энергий (106, 145, 172 и 221 МэВ). С помощью комплекса для утренних проверок получали так называемые “псевдоглубинные” кривые (рис. 3), параметры которых сравнивали с базовыми значениями, полученными при вводе системы в эксплуатацию. Этими параметрами являются (рис. 4):

DD – дистальная глубина, то есть положение дистальной точки 80 % от максимума кривой распределения;

PD – проксимальная глубина, то есть положение проксимальной точки 80 % от максимума кривой распределения;

W – ширина пика, то есть расстояние между DD и PD;

DFO – падение дозы, то есть расстояние, на котором происходит падение интенсивности кривой с 80 до 20 %.

Результаты и обсуждение

В результате анализа получены данные по временной стабильности выбранных пара-

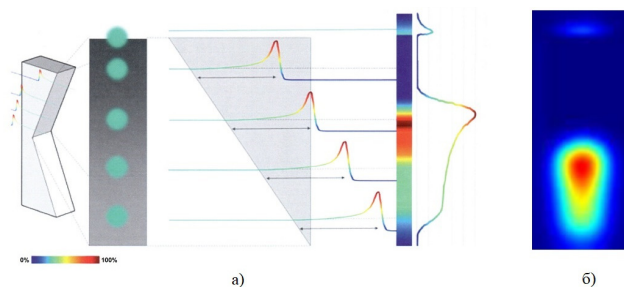


Рис. 3. а – механизм получения кривой “псевдоглубинного” распределения; б – характерное изображение при 172 МэВ

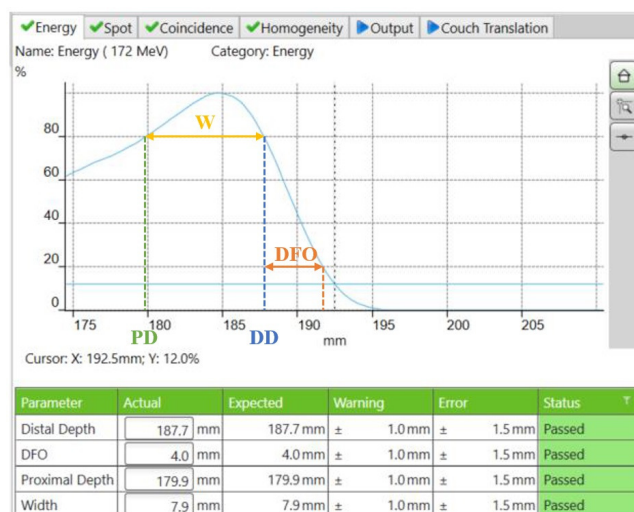


Рис. 4. Вид окна для анализа энергии в ПО MuQA (IBA Dosimetry)

метров каждой энергии. После представления результатов измерений в виде гистограмм был оценен диапазон вариаций анализируемых параметров. В качестве примера рассмотрим изменение параметра DD для выбранных энергий. Предложенный в TG-224 максимальный диапазон отклонения параметров, характеризующих постоянство выбора энергии системой ПТ, равен ± 1 мм. Как наглядно видно из рис. 5–8, наибольшее абсолютное отклонение исследуемых параметров не превышает $\pm 0,4$ мм.

Как следует из табл. 1, наибольшее среднее отклонение наблюдается у параметра Proximal Depth для всех выбранных энергий. Кроме того, для энергии 172 МэВ наблюдается наибольшее отклонение всех исследуемых параметров. При этом среднее отклонение от среднего значения не превышает 0,14 мм.

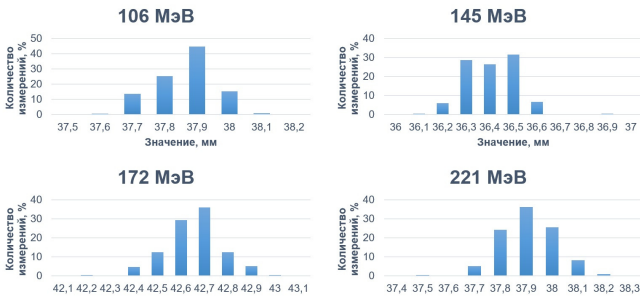


Рис. 5. Колебания DD для различных энергий

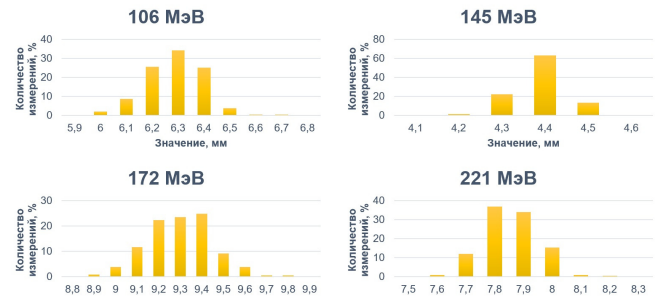


Рис. 7. Колебания W для различных энергий

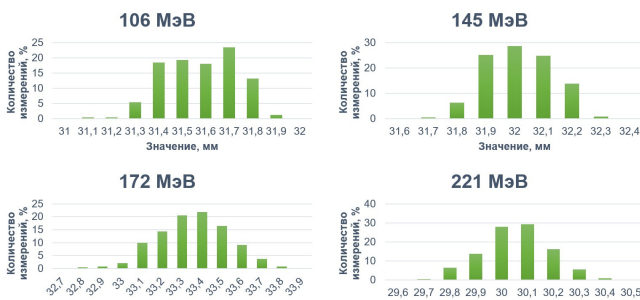


Рис. 6. Колебания PD для различных энергий

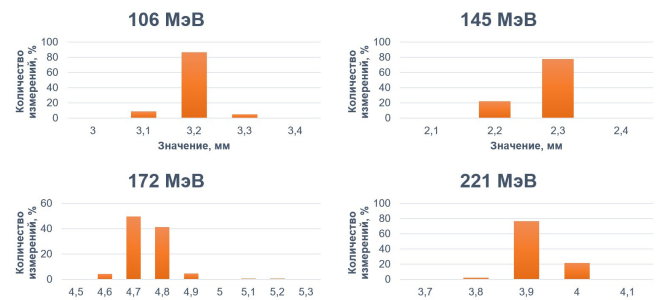


Рис. 8. Колебания DFO для различных энергий

Проведенный анализ показал, что диапазон абсолютных изменений параметров, определяющих постоянство выбора энергии, не превышает $\pm 0,4$ мм. Эти данные позволяют вдвое сократить максимальное ожидаемое отклонение пробега протонного пучка. Дальнейшее изучение этого параметра позволит пересмотреть отступ на PTV в направлении пучка для всех локализаций. Весь изложенный комплекс мероприятий приведет к уменьшению облучения нормальных тканей и, как следствие, к снижению нежелательных лучевых реакций.

В работе P. Park et al [14] описан специфический для пучка метод определения отступа на PTV. Были приняты во внимание неопределенности укладки и пробега пучка в тканях, а также показано, что адаптированный к кон-

кретному пучку отступ на PTV приводит к более высокой надежности плана с одним полем.

В перспективе требуют дополнительного изучения дозиметрические характеристики: постоянство положения спота, размера спота и коллинеарность протонной и рентгеновской систем. Контроль этих параметров приведет к более точному определению отступа на PTV для конкретного пучка в однополевых планах ПТ.

Выводы

Результат анализа постоянства одного из параметров узкого протонного пучка может существенно повлиять на подход к планированию ПТ. Мы ожидаем значительного положительного влияния на качество лечения, в пер-

Таблица 1
Среднее отклонение параметров псевдоглубинной кривой протонного пучка от средних значений, мм

Энергия, МэВ	Исследуемый параметр, мм			
	DD	DFO	PD	W
106	0,08	0,02	0,13	0,09
145	0,09	0,03	0,10	0,04
172	0,10	0,06	0,14	0,12
221	0,08	0,03	0,11	0,08

вую очередь за счет уменьшения объема нормальных тканей, подвергшихся облучению, и снижению частоты ранних лучевых реакций.

Получен результат, позволивший пересмотреть подход к планированию ПТ, в частности, к выбору отступов на PTV, путем использования новых уточненных допусков на предельные отклонения параметров. Проведен анализ эффективности нововведений в рамках ежедневного контроля качества системы ПТ. Дальнейшая область наших научно-исследовательских интересов при определении PTV лежит в сфере дополнительного исследования других дозиметрических параметров протонного пучка.

Список литературы

1. Климанов В.А. Дозиметрическое планирование лучевой терапии. Часть 2. Дистанционная лучевая терапия пучками заряженных частиц и нейтронов. Брахитерапия и радионуклидная терапия: учебное пособие. М.: МИФИ, Москва, Россия. 2008; 328. [Klimanov V.A. Dosimetric planning of radiation therapy. Part 2. Remote radiation therapy with beams of charged particles and neutrons. Brachytherapy and radionuclide therapy: textbook. Moscow: MEPhI, Moscow, Russia. 2008; 328 (In Russian)].
2. Dosanjh M., Cirilli M., Myers S., Navin S. Medical Applications at CERN and the ENLIGHT Network. *Front. Oncol.* 2016; 6: 9. DOI: 10.3389/fonc.2016.00009.
3. Шулепова Л.И., Маслюкова Е.А., Бондаренко А.В., Демидова А.М., Позыгун Я.С., Пермяков И.М. и др. Протонная терапия в федеральном высокотехнологичном центре медицинской радиологии г. Димитровграда. *Медицинская физика.* 2019; (3(83)). [Shulepova L.I., Maslyukova E.A., Bondarenko A.V., Demidova A.M., Pozygun Ya. S., Permyakov I.M. etc. Proton therapy at the Federal High-tech Center of Medical Radiology in Dimitrovgrad. *Medical physics.* 2019; 3(83) (In Russian)].
4. Шулепова Л.И., Маслюкова Е.А., Колесников А.Н., Кузнецова Е.В., Позыгун Я.С., Бандуров П.Г. и др. Алгоритм определения дозиметрических параметров протонного пучка для создания модели в системе планирования лучевой терапии. *Медицинская физика.* 2020; (4(88)). [Shulepova L.I., Maslyukova E.A., Kolesnikov A.N., Kuznetsova E.V., Pozygun Ya.S., Bandurov P.G. et al. An algorithm for determining the dosimetric parameters of a proton beam to create a model in the radiation therapy planning system. *Medical Physics.* 2020; (4(88)) (In Russian)].
5. Arjomandy B., Taylor P., Ainsley C., Safai S., Sahoo N., Pankuch M. et al. AAPM task group 224: Comprehensive proton therapy machine quality assurance. *Med Phys.* 2019; 46: 8.
6. Almurayshid M., Helo Y., Kacperek A., Griffiths J., Hebden J., Gibson A. Quality assurance in proton beam therapy using a plastic scintillator and a commercially available digital camera. *J Appl Clin Med Phys.* 2017; 18(5). DOI: 10.1002/acm2.12143.
7. Actis O., Meer D., Kцnig S., Weber D.C., Mayor A. A comprehensive and efficient daily quality assurance for PBS proton therapy. *Phys Med Biol.* 2017; 62(5). DOI: 10.1088/1361-6560/aa5131.
8. Ding X., Zheng Y., Zeidan O., Mascia A., Hsi W., Kang Y., Ramirez E., Schreuder N., Harris B. A novel daily QA system for proton therapy. *J Appl Clin Med Phys.* 2013 Mar 4;14(2): 4058. DOI: 10.1120/jacmp.v14i2.4058.
9. Кузнецова Е.В., Матич А., Колесников А.Н., Бандуров П.Г., Позыгун Я.С., Маланов В.Ю. и др. Определение непреднамеренной ошибки в значении энергии протонного пучка для лучевой терапии. *Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ.* 2021; 10(3): 217-29. DOI: 10.1134/S2304487X2103007X. [Kuznetsova E.V., Matic A., Kolesnikov A.N., Bandurov P.G., Pozygun Ya.S., Malanov V.Yu. et al. Determination of an unintentional error in the value of the proton beam energy for radiation therapy. *Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI.* 2021; 10(3): 217-29 (In Russian)]. DOI: 10.1134/S2304487X2103007X].
10. Киселев В.А., Демидова А.М., Маслюкова Е.А., Фомина Е.С. Оптимизация программы ежедневной гарантии качества системы протонной терапии. *Медицинская физика.* 2021; (1(89)). [Kiselev V.A., Demidova A.M., Maslyukova E.A., Fomina E.S.. Optimization of the daily quality assurance program of the proton therapy system. *Medical Physics.* 2021; (1(89)) (In Russian).]
11. Климанов В.А., Самойлов А.С., Удалов Ю.Д., Гаджинов А.Э., Пешкин Я.А. Физика планирования протонной лучевой терапии. *Медицинская радиология и радиационная без-*

- опасность. 2019; 64(2): 23-32. DOI: 10.12737/article_5ca5e2677a1a06.60363700. [Klimanov V.A., Samoilov A.S., Udalov Yu.D., Gadzhinov A.E., Peshkin Ya.A. Physics of proton therapy treatment planning. Medical Radiology and Radiation Safety. 2019; 64(2): 23-32. DOI: 10.12737/article_5ca5e2677a1a06.60363700 (In Russian)].
12. Удалов Ю.Д., Слобина Е.Л., Данилова Л.А., Желудкова О.Г., Киселев В.А., Незвецкий А.В. и др. Возможности протонной терапии при повторном облучении диффузной опухоли ствола мозга у детей. Медицина экстремальных ситуаций. 2021; 23(4): 65-71. DOI: 10.47183/mes.2021.039. [Udalov Yu.D., Slobina E.L., Danilova L.A., Zheludkova O.G., Kiselev V.A., Nedzvetskiy A.V., et. al. The possibilities of proton therapy for repeated irradiation of diffuse brain stem tumors in children. Medicine of extreme situations. 2021; 23(4): 65-71. (In Russian) DOI: 10.47183/mes.2021.039].
13. Галкин Р.В., Гурский С.В., Jongen Y., Карамышева Г.А., Казаринов М.Ю., Коровкин С.А. и др. Циклотрон С235-V3 для центра протонной терапии госпитального комплекса медицинской радиологии в Дмитровграде. Журнал технической физики. 2014; 84(6): 132-9. [Galkin R.V., Gursky S.V., Jongen Y., Karamysheva G.A., Kazarinov M.U., Korovkin S.A. etc. Cyclotron C235-V3 for the proton therapy center of the hospital complex of Medical Radiology in Dimitrovgrad. Journal of Technical Physics. 2014; 84(6): 132-9 (In Russian)].
14. Park P., Zhu X., Lee A. et al. A Beam-Specific Planning Target Volume (PTV) Design for Proton Therapy to Account for Setup and Range Uncertainties. Int J Radiat Oncol Biol Phys. 2012; 82(2). DOI: 10.1016/j.ijrobp.2011.05.011.

INVESTIGATION OF THE CONSTANCY OF THE DOSIMETRIC PARAMETERS OF THE PROTON THERAPY SYSTEM IN THE FSCCRO OF FMBA OF RUSSIA

V.A. Kiselev^{1,2}, A.M. Demidova^{1,2}, Yu.D. Udalov¹, A.N. Kolesnikov²,
S.E. Gritsenko¹, E.N. Ustimova¹

¹ Federal Scientific Clinical Center of Medical Radiology and Oncology Dimitrovgrad, Russia

² Dimitrovgrad Institute of Engineering and Technology, Dimitrovgrad, Russia

Purpose: Determination of fluctuation ranges of dosimetry parameters of the proton therapy system (PTS) to clarify the permissible limit deviations.

Methods and materials: The basis for the quality assurance program (QA) of the PTS is the report of the American Association of Physicists in Medicine AAPM TG-224. According to this report, the QA program is a living, adaptive document that needs to be refined, corrected and optimized taking into account the features of the PTS being in use and the available dosimetry equipment. After setting-up checks within the framework of the daily QA program, it became possible to automatically collect data containing dosimetry parameters of the PTS for subsequent analysis. It was decided to investigate the stability over time of some dosimetry parameters of the PTS in order to determine the ranges of their fluctuations and, as a result, to clarify the permissible deviations of these parameters.

Results: The stability of the parameters associated with the constancy of the proton beam energy selection was studied. As a result, the study showed that the values of the parameters associated with the constancy of the proton beam energy selection fluctuated within much smaller limits compared to those proposed in TG-224.

Conclusion: The obtained result may allow us to reconsider the approach to proton therapy planning system in the FSBI FSCCRO of the FMBA of Russia, in particular, to the choice of PTV margins. The new refined tolerances for the maximum deviations of the analyzed parameters are proposed in this research work.

Key words: dosimetric parameters, proton therapy, quality assurance, daily control

E-mail: kiselevva@fvcmrmba.ru