

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ

УДК 539.1.04+004.85

МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЗЫ ПО ГЛУБИНЕ В ПРОТОННОЙ ТЕРАПИИ

© 2023 г. Л. Ю. Овчинникова^{a, b, *}, А. С. Курилик^a

^aИнститут ядерных исследований РАН, Москва, 117312 Россия

^bАО «НИИ «Феррит-Домен», Санкт-Петербург, 196006 Россия

*E-mail: lub.ovch@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.07.2022 г.

После доработки 17.07.2022 г.

Принята к публикации 25.07.2022 г.

Рассмотрена возможность использования нейронной сети для вычисления весовых коэффициентов, соответствующих отдельным кривым Брэгга, при формировании равномерного распределения дозы по глубине для целей протонной терапии.

Ключевые слова: протонная терапия, дозовое поле, Geant4, машинное обучение, PyTorch

DOI: 10.56304/S2079562922050347

1. ВВЕДЕНИЕ

При проведении исследований в области создания протонных ускорителей для радиационной терапии, важно иметь возможность, на основе характеристик пучка протонов, быстро оценивать характеристики пространственного распределения поглощенной дозы, а также, на основе желаемых характеристик распределения поглощенной дозы, формулировать требования к пучку протонов, и, следовательно, к ускорителю. Это особенно важно если регулирование энергии терапевтического пучка осуществляется не поглотителями, а непосредственно самим ускорителем.

Одной из задач является формирование, из отдельных пиков Брэгга, равномерного распределения дозы по глубине в области облучаемой опухоли. Итеративный метод требует сложной формализации и неприменим при последующем переходе к 3D задаче. Система линейных уравнений и минимизация среднеквадратичного отклонения могут давать отрицательные значения весовых коэффициентов [1]. Вышеописанные и другие смежные задачи могут быть решены с применением машинного обучения [2].

2. МЕТОДИКА

Для оценки возможностей компактного линейного ускорителя протонов [3], с использованием Geant4 [4], были выполнены расчеты [5] пространственного распределения поглощенной дозы в водном фантоме для протонов с энергиями от 125 до 177 МэВ с шагом 4 МэВ. Диапазон энер-

гии выбран соответствующим глубине в воде от 110 до 210 мм. С использованием PyTorch [6] была создана и обучена модель нейронной сети. На вход сети подаются требуемые характеристики, на выходе получают искомые весовые коэффициенты.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

В данной работе рассматривается задача [7] формирования равномерной зависимости дозы

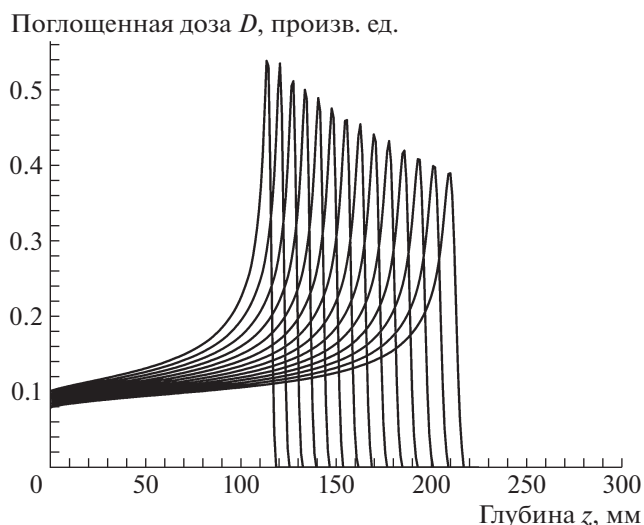


Рис. 1. Кривые Брэгга для протонов с энергиями от 125 до 177 МэВ с шагом 4 МэВ. Всего 14 энергий. Поглотитель — вода. Расчет выполнен с использованием Geant4. Разбиение по глубине с шагом 1 мм.

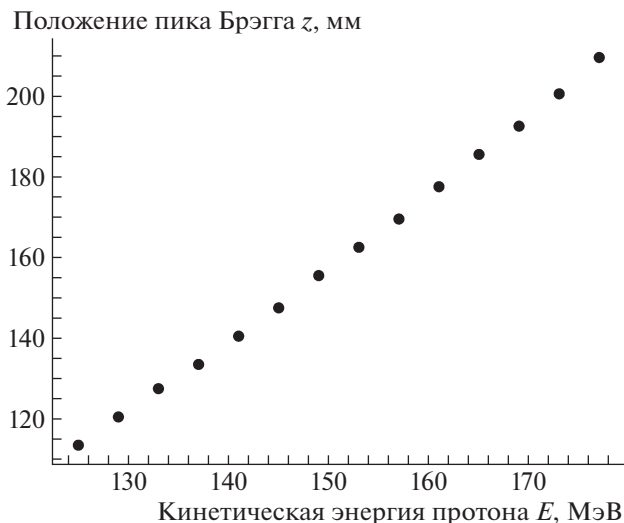


Рис. 2. Положение вершин пиков Брэгга в зависимости от энергии протонов. Незначительные неровности зависимости определяются 1 мм дискретностью разбиения пространства по глубине.

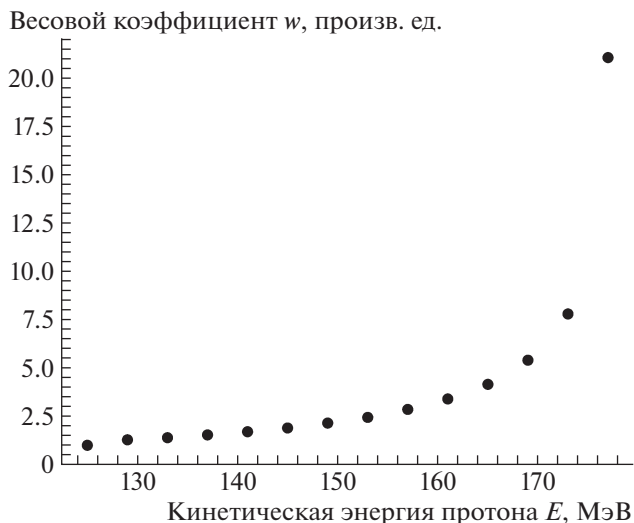


Рис. 3. Полученные с помощью нейронной сети весовые коэффициенты. Для энергии 125 МэВ наблюдается относительно низкое значение, т.к. в данной работе задача решается без учета краевых эффектов.

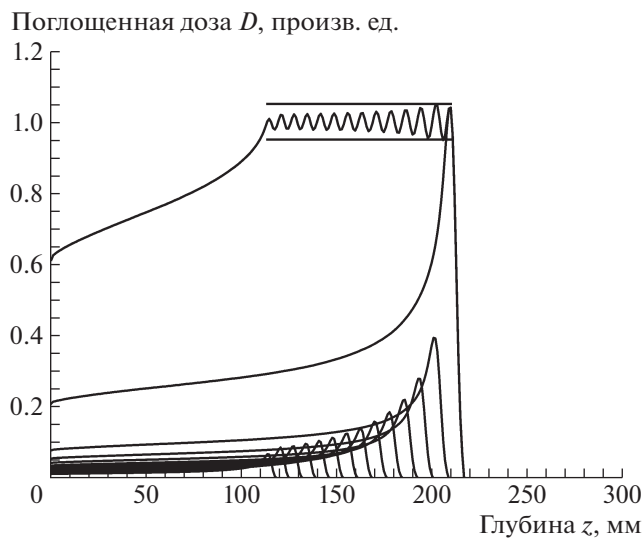


Рис. 4. Отдельные кривые Брэгга умноженные на полученные с помощью нейронной сети весовые коэффициенты и суммарное распределение поглощенной дозы по глубине. Двумя горизонтальными линиями обозначен заданный диапазон допустимого отклонения $\pm 5\%$.

по глубине из отдельных кривых Брэгга, без учета краевых эффектов. На рис. 1 показаны, рассчитанные с использованием Geant4, кривые Брэгга в воде для протонов с энергиями от 125 до 177 МэВ с шагом 4 МэВ. Положение по глубине вершин пиков, соответствующих кривых Брэгга, показано на рис. 2.

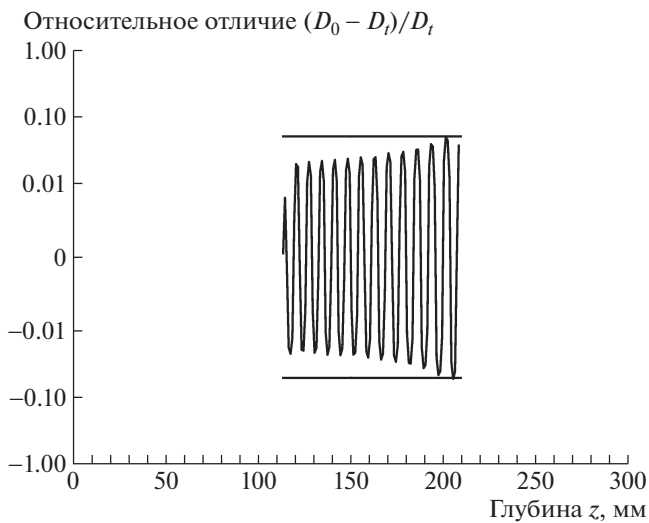


Рис. 5. Относительное отклонение не превышает заданного значения допустимого отклонения $\pm 5\%$, т.е. $|(D_0 - D_t)/D_t| \leq 5 \cdot 10^{-2}$, где D_t — желаемое значение дозы, D_0 = полученное на основе коэффициентов вычисленных нейронной сетью.

Полученные с помощью нейронной сети весовые коэффициенты приведены на рис. 3. Отдельные кривые Брэгга умноженные на весовые коэффициенты и суммарное распределение показаны на рис. 4. Относительное отклонение не превышает заданного значения 5% — рис. 5.

4. ВЫВОДЫ

Результаты полученные в рамках данной работы показывают, что вычисление весовых коэффициентов, соответствующих отдельным кривым Брэгга, при формировании равномерного распределения дозы по глубине, возможно выполнять с использованием нейронных сетей. В дальнейшем мы планируем улучшение полученных результатов и расширение возможностей метода: сравнение различных подходов и выбор оптимального для 1D, снижение вычислительных затрат, обобщение для 2D, 2.5D и 3D распределений дозы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность коллегам из ИЯИ РАН за многочисленные консультации и полезные обсуждения, а также за поддержку в проведении исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ/REFERENCES

1. Яковлев И.А. Методы повышения конформности протонной лучевой терапии. Дис. к.ф.-м.н. 01.04.01. Москва. 2018.
2. RapidPlan Knowledge-Based Planning. Varian Medical Systems. 2013. <https://www.varian.com/products/radiotherapy/treatment-planning/rapid-planknowledgebased-planning>
3. Paramonov V., Durkin A., Kolomiets A.A // Proc. Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC'21). 2021. V. 27. P. 117. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB04>
4. Allison J. et al. // Nucl. Instrum. Methods Phys., Res. Sect. A. 2016. V. 835. P. 186. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2016.06.125>
5. Ovchinnikova L. et al. // Proc. Russian Particle Accelerator Conf. (RuPAC'21). 2021. V. 27. P. 182. <https://doi.org/10.18429/JACoW-RuPAC2021-MOP-SA41>
6. Paszke A. et al. // Adv. Neural Inform. Proc. Sys. 2019. V. 32. P. 8024. <https://papers.neurips.cc/paper/9015-pytorch-an-imperative-style-high-performance-deep-learning-library.pdf>
7. Ovchinnikova L., Kurilik A. // Proc. LaPlas-2022. 2022. P. 297. <https://laplas.mephi.ru/wp-content/uploads/2022/04/Тезисы2022.pdf>

Machine Learning for Depth Dose Distribution Forming in Proton Therapy

L. Yu. Ovchinnikova^{1, 2, *} and A. S. Kurilik¹

¹*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117312 Russia*

²*JSC Ferrit-Domen Research Institute, St. Petersburg, 196006 Russia*

**e-mail: lub.ovch@yandex.ru*

Received July 17, 2022; revised July 17, 2022; accepted July 25, 2022

Abstract—We have considered the possibility of using a neural network for calculation the weight coefficients corresponding to the Bragg curves for forming a uniform depth dose distribution in proton therapy.

Keywords: proton therapy, dose distribution, Geant4, machine learning, PyTorch