



**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»**

**Институт физики высоких энергий имени А.А. Логунова
Национального исследовательского центра
«Курчатовский институт»**

Препринт 2026–4

С.К. Шаров

**Изготовление болюсов для терапии пучком ионов
углерода методом трехмерной печати**

Направлено в журнал
Медицинская техника

Протвино 2026

Аннотация

Шаров С.К. Изготовление болюсов для терапии пучком ионов углерода методом трехмерной печати: Препринт НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ 2026–4. – Протвино, 2026. – 14 с., 12 рис., библиогр.: 11.

Разработана система изготовления индивидуальных болюсов для терапии пучком ионов углерода на основе технологии трёхмерной печати. Выполнены: формирование цифровой модели, изготовление образца, создание маркировки изделия и геометрическая верификация изготовленного образца методом 3D-сканирования с последующим анализом результатов. Среднее отклонение геометрических размеров образца болюса от математической модели составило 0,256 мм при стандартном отклонении 0,412 мм. Полученные результаты подтверждают работоспособность разработанной системы.

Abstract

Sharov S.K. Manufacturing of boluses for ion beam therapy using 3D printing: NRC «Kurchatov Institute» – IHEP Preprint 2026–4. – Protvino, 2026. – 14 p., 12 fig., bibliogr.: 11.

A system for producing individualized boluses for carbon ion beam therapy using 3D printing technology was developed. A digital model was created, product labeling was created, and the geometric verification of the manufactured sample was performed using 3D scanning, followed by analysis of the results. The average geometric deviation was 0.256 mm, with a standard deviation of 0.412 mm. These results confirm the viability of the developed system.

Введение

Применение лучевой терапии с использованием пучков ионов в сочетании с другими методами лечения онкологических заболеваний позволяет достичь хороших терапевтических результатов. Для этих целей в настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ создаётся экспериментальный клинический комплекс лучевой терапии с пучками ионов углерода [1]. Для эффективного проведения процедур лучевой терапии необходимо формировать оптимальное распределение дозы в облучаемом объеме. Для этого используются для каждого пациента индивидуальные болюсы и модификаторы пика Брэгга – пучковые фильтры. Болюсы представляют собой устройства, изготавливаемые из тканеэквивалентных материалов и располагаемые на поверхности тела пациента или перед ним, и позволяют изменять распределение поглощенной дозы в облучаемом объеме по глубине и формировать дальнюю стенку облучаемого объема по пучку в соответствии с клинической задачей.

Традиционно подобные изделия изготавливаются на сверлильно-фрезерном станке с ЧПУ [2], либо в лаборатории с использованием физических и химических методов [3, 4]. Недостатками таких методик являются трудоемкость процесса создания, длительность изготовления и высокая стоимость. Также стоит отметить, что при традиционном подходе возникает вероятность возникновения технологических погрешностей, что особенно чувствительно для пучка ионов углерода.

Развитие аддитивных технологий предоставляет возможность изготовления индивидуальных модифицирующих устройств на основе данных системы планирования лучевой терапии [5]. Однако внедрение 3D-печати в практику терапевтических исследований требует создания системы, включающей этапы автоматизированного построения цифровой модели, производства изделия и метрологического контроля соответствия геометрии.

Поскольку болюсы изготавливаются индивидуально для конкретного плана облучения, особое значение приобретает задача их корректной идентификации и сопоставления с данными системы планирования. Ошибка при использовании модифицирующего устройства, рассчитанного для другого пациента или иной энергии пучка, может

привести к отклонению распределения дозы от заданных параметров и медицинской аварии. В условиях клинического или экспериментального применения требуется обеспечение прослеживаемости изделия на всех этапах – от цифровой модели до процедуры облучения. Одним из рациональных решений данной задачи является внедрение системы цифровой маркировки модифицирующих устройств. В качестве формата маркировки в разработанной системе выбран QR-код. По сравнению с линейными штрихкодами, QR-коды обладают большей информационной ёмкостью при компактных размерах, что позволяет кодировать не только уникальный идентификатор изделия, но и параметры плана облучения. Кроме того, QR-коды содержат встроенные механизмы коррекции ошибок и не требуют строгой ориентации при считывании, что повышает надёжность идентификации в клинических условиях. Указанные свойства делают данный формат более предпочтительным для системы цифровой прослеживаемости индивидуальных болюсов и пучковых фильтров.

Целью работы является разработка комплексной системы автоматизированного проектирования и изготовления методом 3D-печати индивидуальных болюсов для пучка ионов углерода, включающей механизмы цифровой идентификации изделий и метрологического контроля, а также экспериментальная оценка точности воспроизведения их геометрических параметров при использовании технологии FDM (Fused Deposition Modeling) печати. Суть данной технологии заключается в послойном построении изделий путем фиксации слоев материала, из которого создается изделие, и их соединения между собой сплавлением.

Материалы и методы

Для создания индивидуальных модифицирующих устройств с помощью 3D печати необходимо получить соответствующие данные из системы планирования [6–8]. В качестве примера были использованы данные пациента, пораженного раком предстательной железы. В системе планирования для данного пациента был произведен расчет болюса для энергетического диапазона 170–272,8 МэВ/нуклон. Такой диапазон энергии покрывает весь облучаемый объем по глубине. При этом нижняя граница энергетического диапазона (170 МэВ/нуклон) соответствует пробегу ионов до проксимальной

границы мишени, а верхняя граница (272,8 МэВ/нуклон) – до дистальной границы вдоль направления распространения пучка.

Для выполнения процедуры создания моделей разработана программа, способная переводить данные, полученные из системы планирования в формате DICOM в цифровую модель формата STL, для 3D принтера. На рисунке 1 представлен интерфейс программы с загруженными моделями.

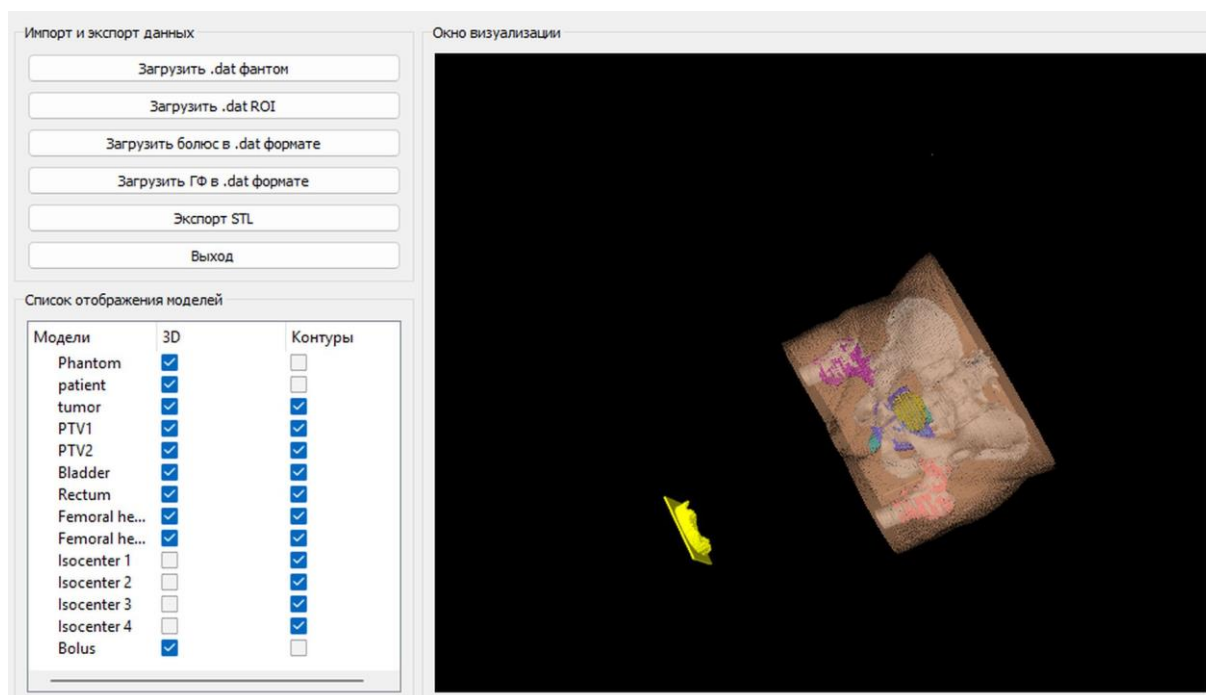


Рисунок 1. Графический интерфейс программы.

Программа написана на языке программирования Python, а в качестве основных библиотек использовались VTK [9] для обработки и визуализации геометрии моделей и PyQt5 [10] для создания пользовательского графического интерфейса.

На рисунке 2 представлен итог работы программы.

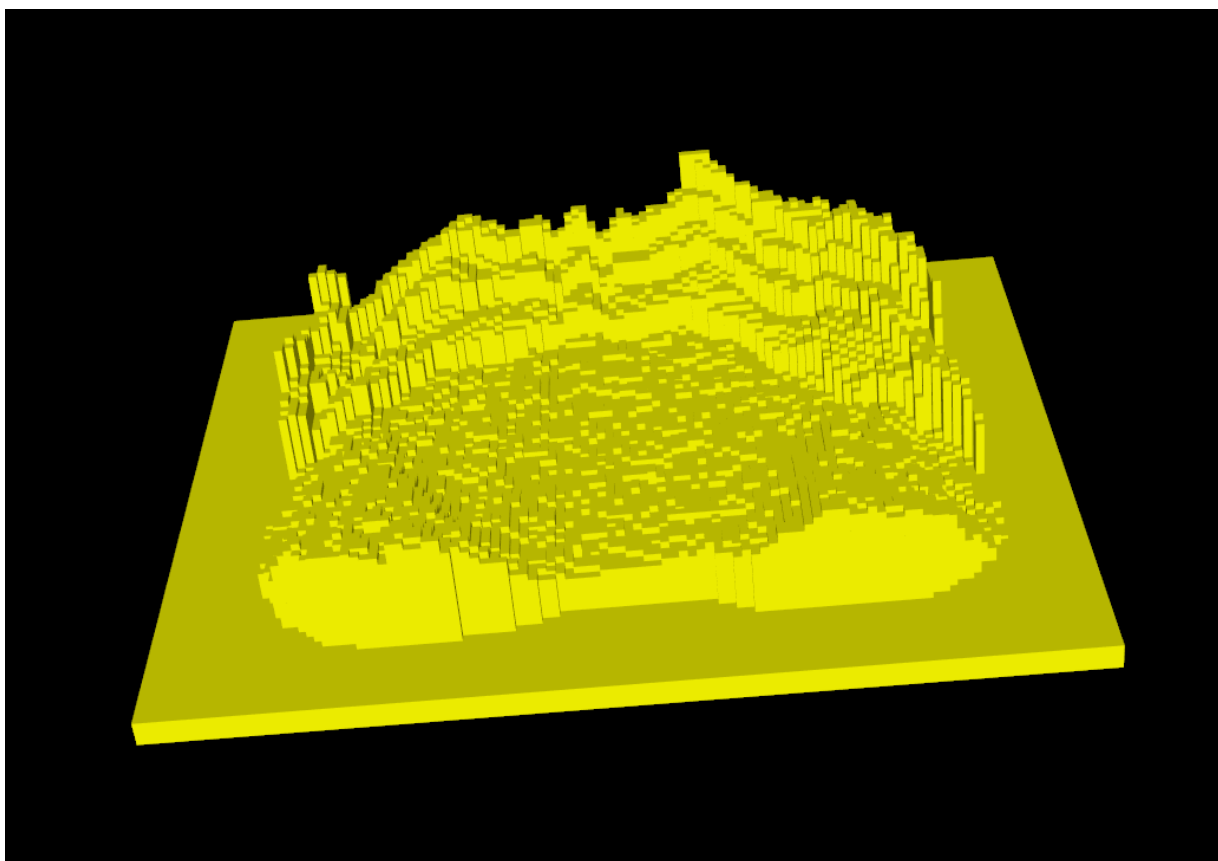


Рисунок 2. Цифровая модель бюста.

Габаритные размеры цифровой модели бюста – $108 \times 88 \times 27,74$ мм. Полученные STL модели обрабатывались в программе слайсере QIDI Studio [11]. В ней был сформирован управляющий код формата gcode для 3D принтера. На этом этапе задаются параметры скорости печати, высоты слоя и процент заполнения. Следует отметить, что высота слоя влияет на высоту полученной модели.

Также в рамках данной программы реализована возможность генерации QR-кодов для маркировки 3D печатных изделий. QR-код бюста включает в себя, помимо идентификационного номера некоторую информацию о пациенте, такую как его ID или информацию о его позиционировании на пучке ионов углерода. На рисунке 3 QR-код, с помощью которого данное изделие маркируется.

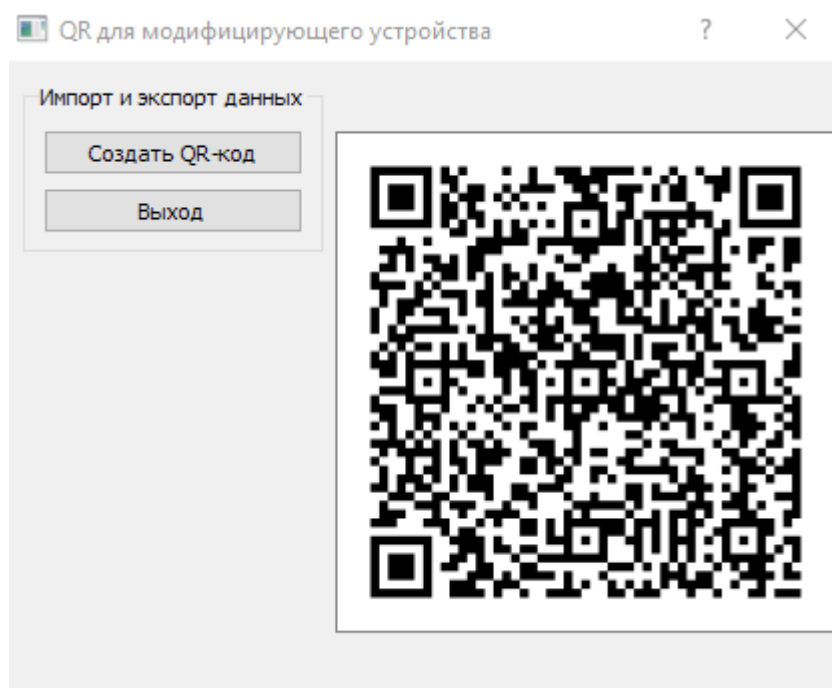


Рисунок 3. Окно модуля создания QR-кода для болюса.

Для послойной 3D-печати болюса использовался FDM 3D-принтер QIDI Q2. Параметры 3D печати:

- температура сопла – 220 C°,
- температура стола – 60 C°,
- скорость печати слоёв – 30 мм/с,
- скорость перемещения – 500 мм/с,
- Диаметр сопла – 0,4 мм,
- высота слоя – 0,16 мм,
- коэффициент заполнения – 100 %.

Параметры печати выбирались из соображений соотношения стабильности печати и времени печати. Стоит отметить, что при данных параметров печати за счет высоты слоя, максимальная высота 3D-печатного болюса будет 27,72 мм, а время печати составит 3 часа 45 минут. Изделие было напечатано PLA пластиком компании REC3D. Также после завершения процесса 3D печати болюса, изделие не отделялась от платформы 15 минут для исключения деформации подложки. Окончательный вид болюса представлен на рис. 4.



Рисунок 4. Фотография болюса, напечатанного на 3D принтере.

Визуальная оценка полученного изделия показала, что при 3D печати на FDM принтере места с прямыми углами немного “скругляются”. Это связано с особенностью перемещения печатной головы принтера во время отливки пластика. В остальном полученное изделие не имеет отличий от цифровой модели.

Проверка полученных изделий на 3D сканере

Для проверки исходного изделия использовался 3D-сканер RangeVision Neopoint с заявленной пространственной точностью 0,05 мм и с 3D разрешением 0,15 мм. Полученные данные были подвергнуты обработке, которая состояла из реконструирования поверхностей и удаление лишних шумов и артефактов, возникших в процессе 3D сканирования. Вид отсканированной модели представлен на рис. 5.

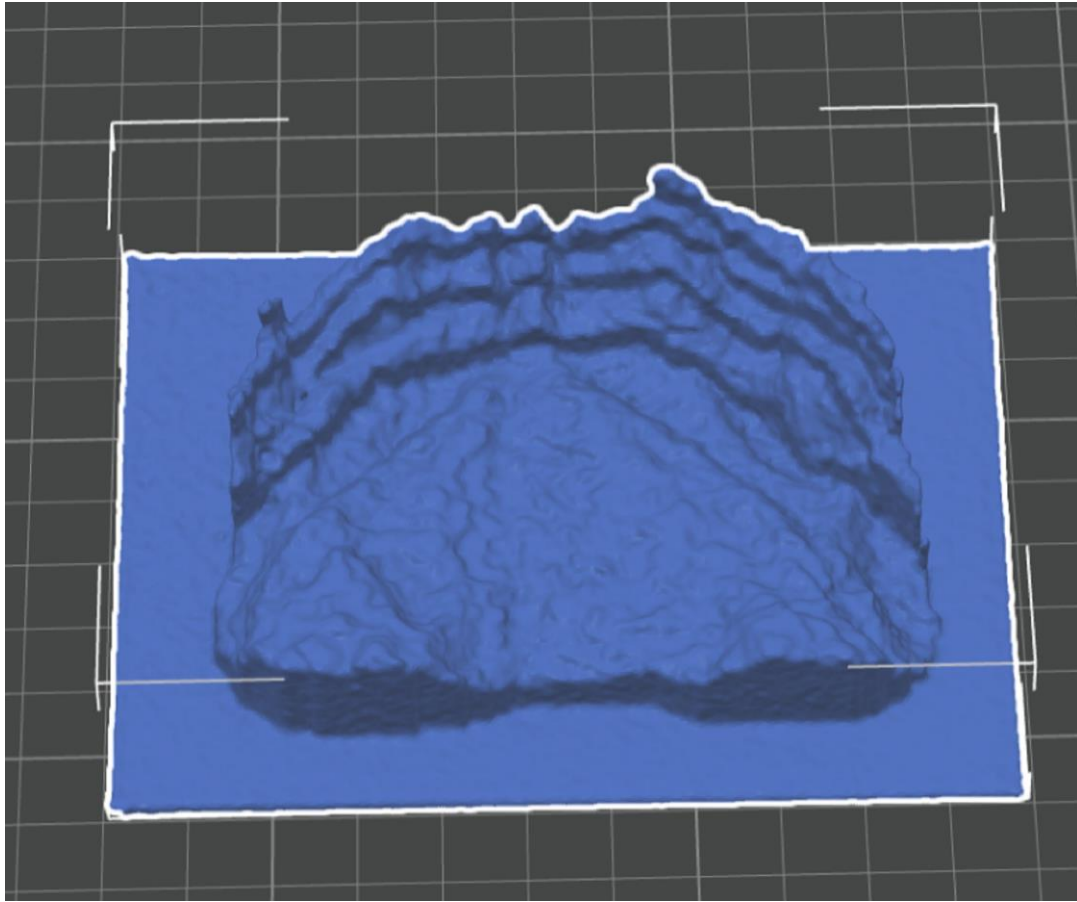


Рисунок 5. Отсканированная модель.

Ввиду особенности реконструкции изображений 3D-сканера, не представляется возможным сохранить в точности внутреннюю структуру изделия, поэтому в данной работе будет проводиться оценка точности полученной толщины, т.е. оценка по координате Z .

Полученные данные обрабатывались с помощью библиотеки Matplotlib. На рисунках 6-7 представлены карты высот для отсканированных и цифровых моделей.

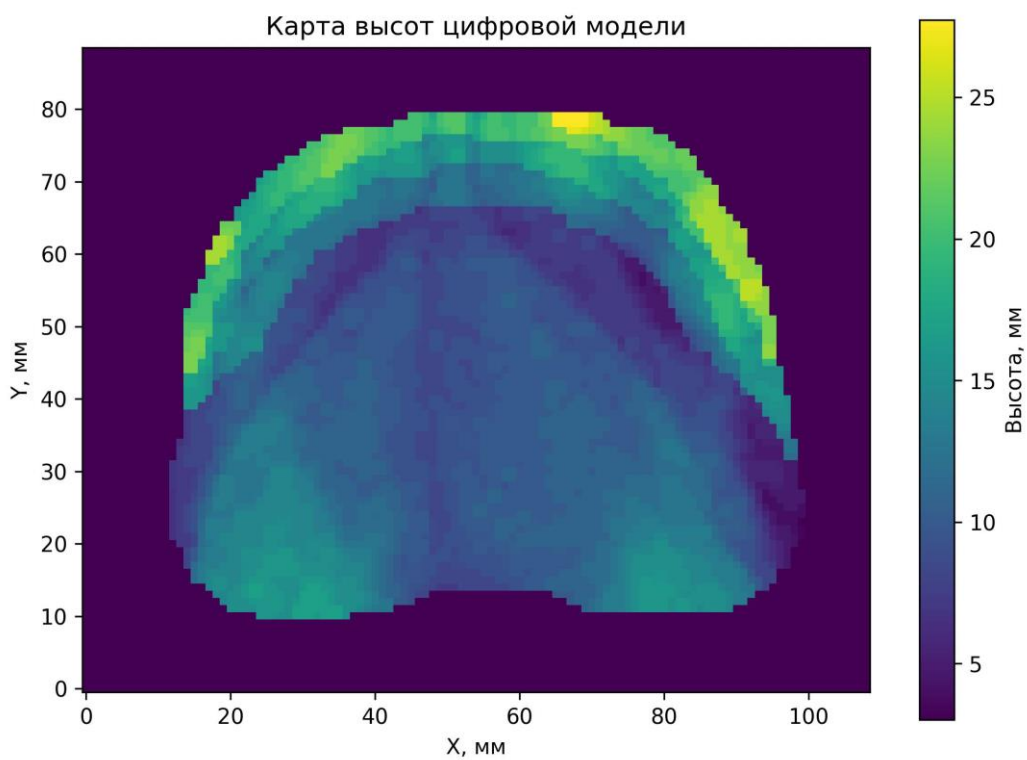


Рисунок 6. Карта высот цифровой модели.

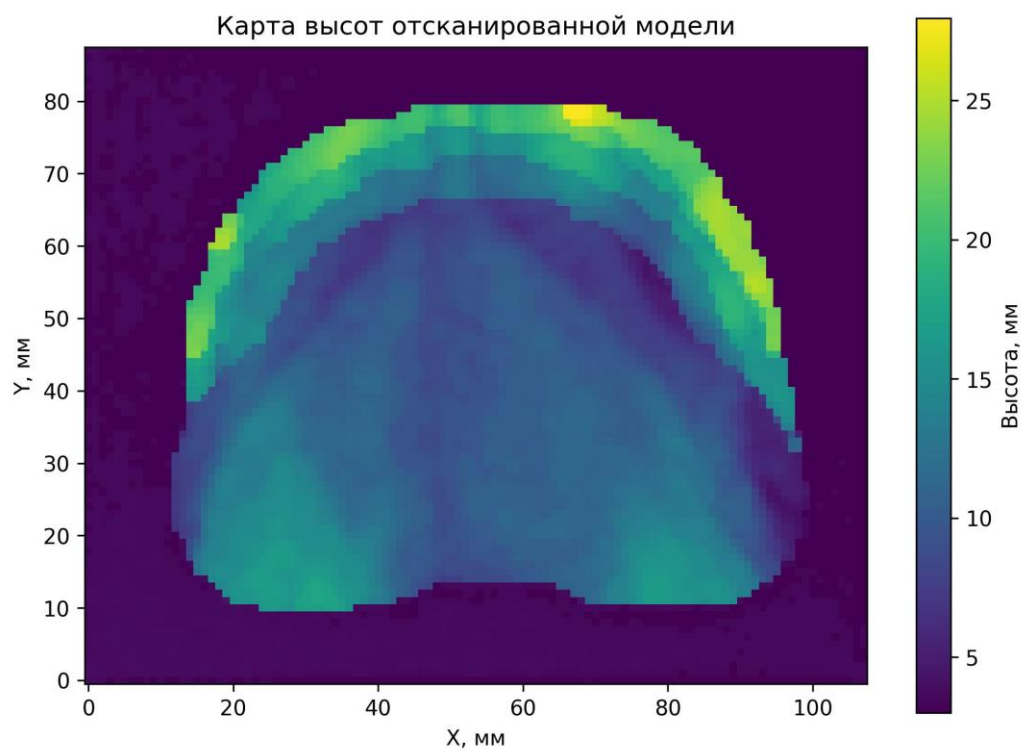


Рисунок 7. Карта высот отсканированной модели.

При сравнении рисунков 6 и 7 выяснилось, что лишь 0,83 % высот имеет разницу больше 1 мм.

Среднеквадратичная ошибка, рассчитанная по маске валидных точек, составила 0,49 мм. Карта ошибки демонстрирует пространственное распределение локальных вкладов в общую погрешность. Вычисление среднеквадратичной ошибки проводилось по формуле:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \hat{z}_i)^2} \quad (1)$$

где n – число точек, z_i – высота точки отсканированной модели, \hat{z}_i – высота точки цифровой модели.

На рисунках 8-9 представлены средние профили вдоль осей X и Y.

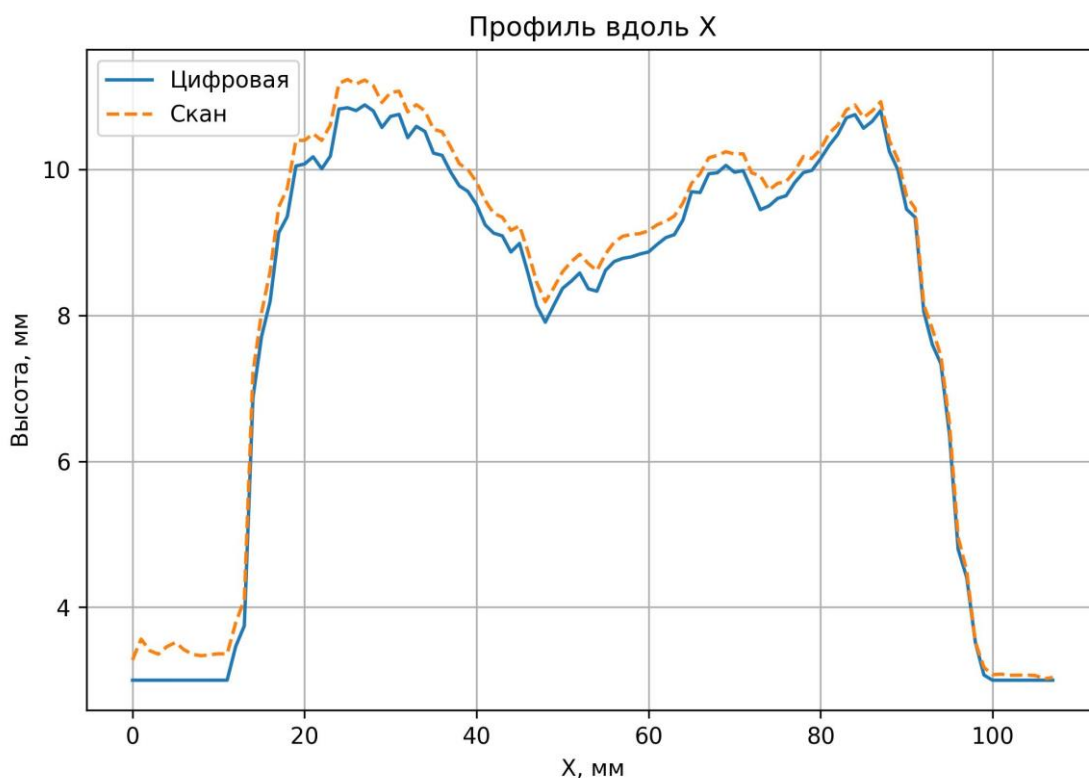


Рисунок 8. Профиль вдоль оси X.

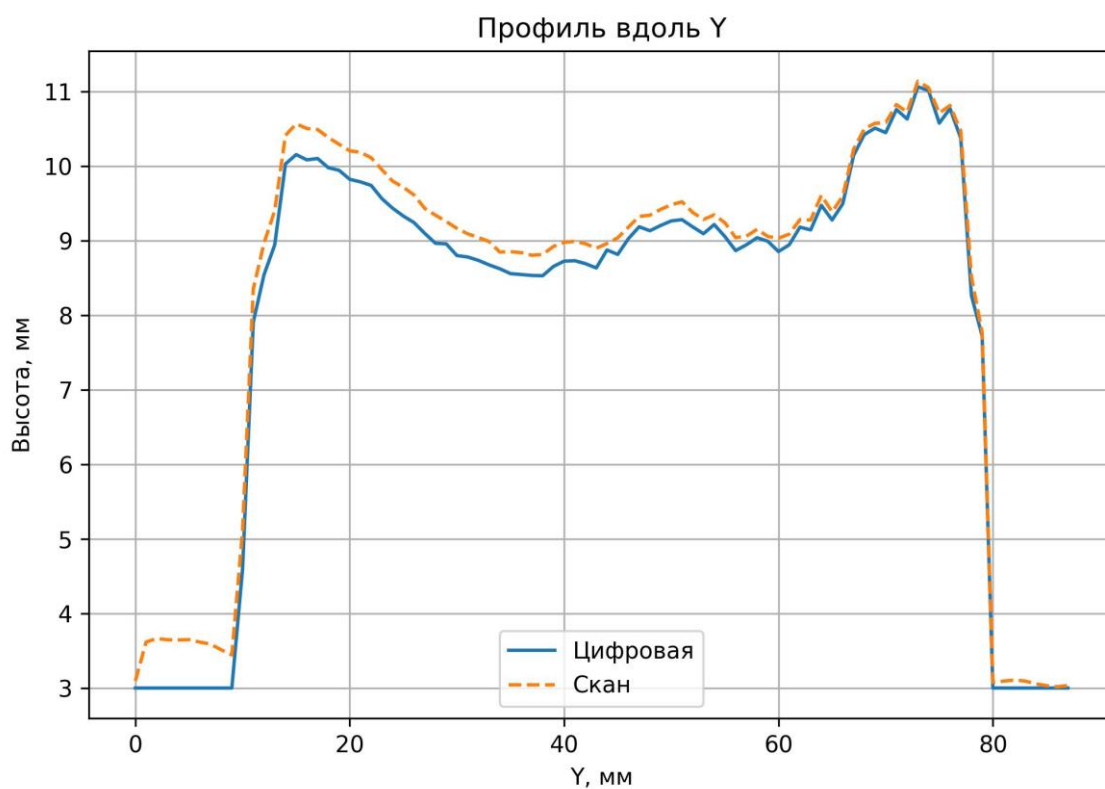


Рисунок 9. Профиль вдоль оси Y.

Средние профили вдоль осей X и Y демонстрируют совпадение формы цифровой и напечатанной модели. Расхождения носят характер малой амплитуды (<0.5 мм) и не имеют систематической направленности.

На рисунке 10-11 представлены распределения высот отсканированной и цифровой модели.



Рисунок 10. Распределение высот цифровой модели.

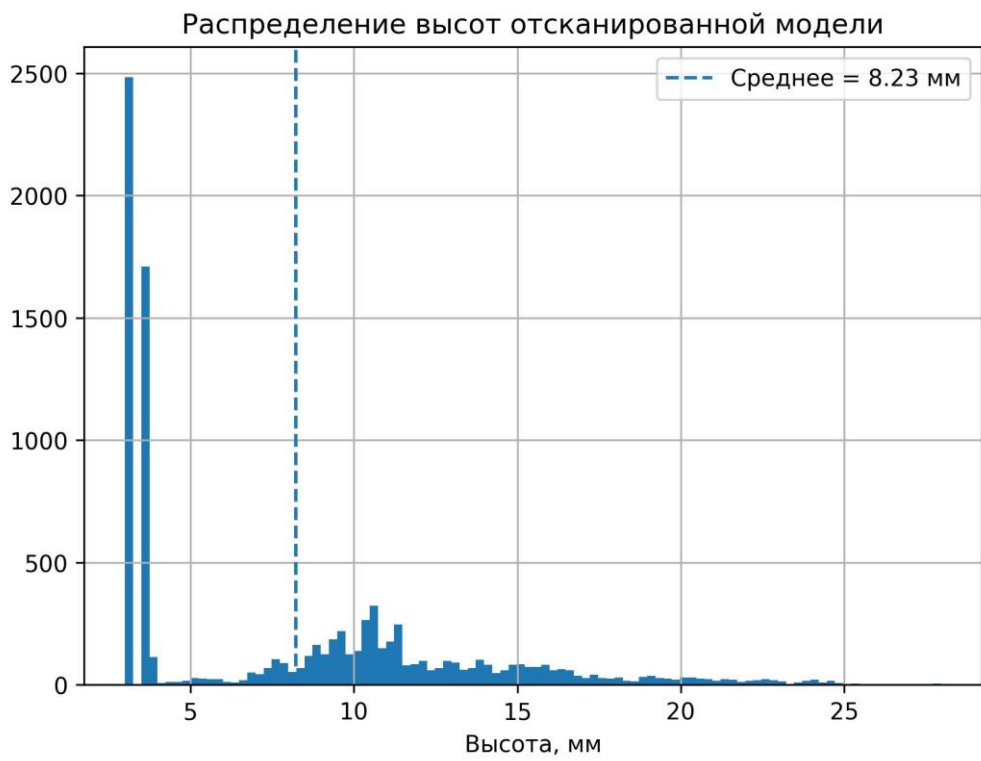


Рисунок 11. Распределение высот отсканированной модели.

Гистограммы распределения высоты демонстрируют статистическое совпадение геометрии цифровой и напечатанной модели. Среднее отклонение высоты составляет менее 0.5 мм, что находится в пределах точности используемого метода 3D-печати и оптического сканирования.

На рисунке 12 представлена гистограмма разницы высот цифровой и отсканированной модели.

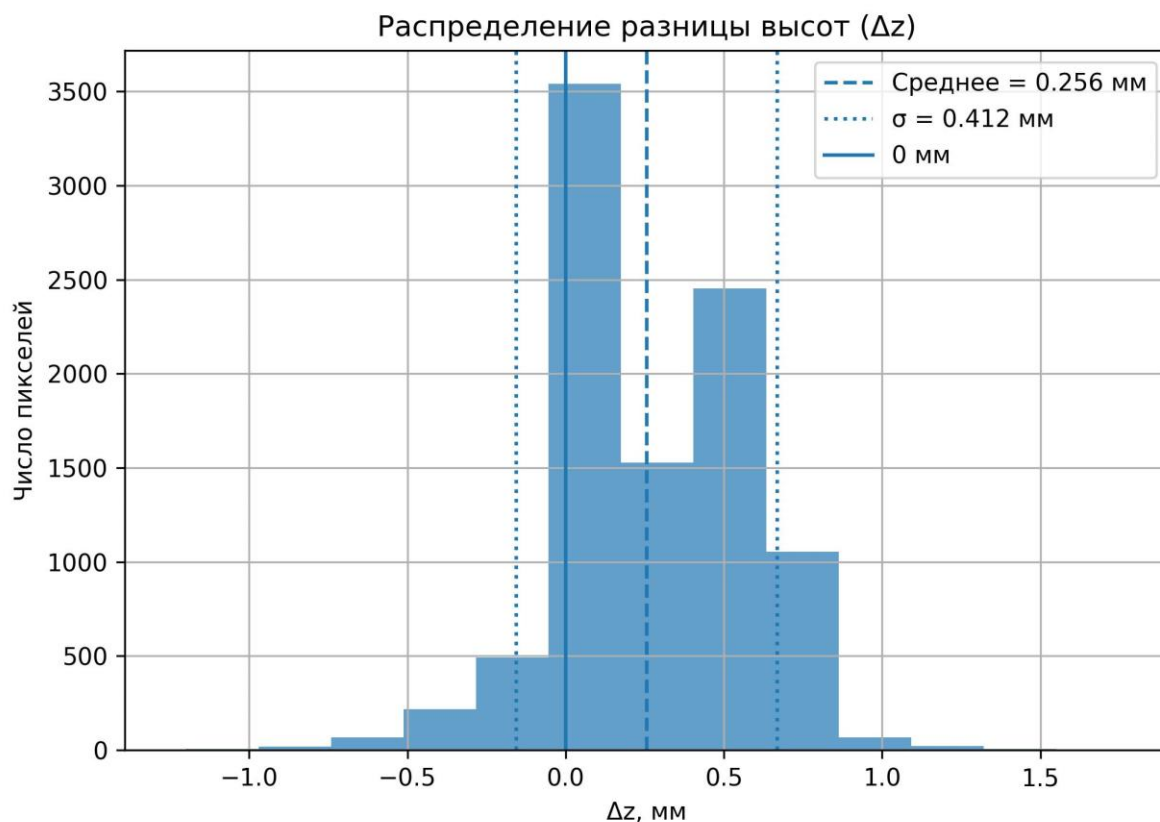


Рисунок 12. Распределение разницы высот.

Данное распределение имеет среднюю величину разницы высот 0,26 мм, стандартное отклонение – 0,41 мм. Небольшой положительный сдвиг указывает на наличие систематической погрешности, которая связана с особенностями 3D-печати и сканирования.

Заключение

Разработана система изготовления болусов с применением технологии FDM-печати для индивидуальных пациентов, которая обеспечивает полный технологический

цикл – от использования результатов системы планирования облучения до контроля качества готового изделия – и может быть внедрена в клиническую практику ионной лучевой терапии.

Предложенный программный модуль обеспечивает преобразование данных системы планирования в STL-модель с возможностью маркировки изделий QR- кодом и подготовки их к 3D-печати.

Экспериментальная верификация геометрии напечатанного болуса с использованием 3D-сканирования показала высокую степень соответствия цифровой и изготовленной моделей. Среднеквадратичная ошибка составила 0,49 мм, при этом доля точек с отклонением более 1 мм не превышала 0,83%. Анализ пространственного распределения ошибок и профилей вдоль осей X и Y не выявил систематических деформаций или нелинейных искажений формы.

Разработанная технология может быть расширена для изготовления других модифицирующих устройств, в частности гребенчатых фильтров.

Благодарности

Автор выражает благодарность докторам физико-математических наук Воробьеву А.П. и Ющенко О.П. за помощь в подготовке работы, обсуждение результатов и предоставление экспериментальных данных.

Список литературы

- [1] Ю.М. Антипов, А.П. Солдатов, Создание центра ионной лучевой терапии, Журнал «Медицинская физика», 2016, №2(70), с 5-9.
- [2] Seppälä T. et al. A dosimetric study on the use of bolus materials for treatment of superficial tumors with BNCT // Applied radiation and isotopes. – 2004. – Vol. 61. – No. 5. – P. 787-791
- [3] Агапов А. В. и др. Технология расчета и изготовления устройств формирования протонного пучка в радиотерапии // Письма в ЭЧАЯ. – 2012. – Т. 9. – №. 6-7. – С. 924-936.
- [4] Jaya G. W., Sutanto H. Fabrication and characterization of bolus material using polydimethyl-siloxane // Materials Research Express. – 2018. – Vol. 5. – No. 1. – P. 015307.
- [5] Burleson S. et al. Use of 3D printers to create a patient-specific 3D bolus for external beam therapy // Journal of applied clinical medical physics. – 2015.– Vol. 16. – No. 3. – P. 166-178.
- [6] Е.В. Парменова, О.П. Ющенко, Разработка графической оболочки системы планирования ионной лучевой терапии, Учёные записки Физического факультета МГУ, №2, 2025, ст.2520202, 4 с.
- [7] А.А. Ларионов, О.П. Ющенко, Ф.Р. Студеникин, Метод быстрого расчёта формы болюса в системе планирования ионной лучевой терапии, Вестник МГУ серия физическая (в печати), 2026г.
- [8] М.А. Макарова, О.П. Ющенко, Разработка алгоритма расчёта индивидуальных болюсов для ионной лучевой терапии на базе GEANT 4, Журнал «Медицинская физика» 2026 (в печати)
- [9] Schroeder, Will; Martin, Ken; Lorensen, Bill (2006), The Visualization Toolkit (4th ed.), Kitware, ISBN 978-1-930934-19-1
- [10] PyQt5 [Электронный ресурс]: описание библиотеки / Riverbank Computing. — Электрон. дан. — [S.l.], 2026. — Режим доступа: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/>.
- [11] QIDI Studio [Электронный ресурс]: версия [X.X.X] / QIDI Tech. — URL: <https://qidi3d.com/> (дата обращения: 20.02.2026).

Рукопись поступила 3 апреля 2026 г.

С.К. Шаров

Изготовление болюсов для терапии пучком ионов углерода методом трехмерной печати.

Препринт отпечатан с оригинала-макета, подготовленного авторами.

Подписано к печати 08.04.2026	Формат 60 × 84/16.	Цифровая печать.
Печ.л. 1, 125. Уч.– изд.л. 1, 54.	Тираж 68.	Заказ 14. Индекс 3649.

НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ
142281, Московская область, г. Протвино, пл. Науки, 1

www.ihep.ru; библиотека <http://web.ihep.su/library/pubs/all-w.htm>

Индекс 3649

ПРЕПРИНТ 2026-4,
НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ, 2026
