

УДК 539.1.06

## РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФАНТОМА МЕЛКОГО ЛАБОРАТОРНОГО ЖИВОТНОГО, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

А.А. Григорьева<sup>1,\*</sup>, А.А. Булавская<sup>1</sup>, Е.А. Бушмина<sup>1</sup>, В.А. Куйвалайнен<sup>1</sup>, И.А. Милойчикова<sup>1,2</sup>, С.Г. Стучебров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

<sup>2</sup>Научно-исследовательский институт онкологии, Томский национальный исследовательский медицинский центр Российской академии наук, Томск, 634009, Россия

\*e-mail: [agrigorieva@tpu.ru](mailto:agrigorieva@tpu.ru)

Поступила в редакцию: 16.10.2023

После доработки: 16.10.2023

Принята к публикации: 24.10.2023

Для подтверждения новых радиотерапевтических методик лучевой терапии необходимо проводить большое количество исследований с применением ионизирующего излучения. Эти исследования зачастую осуществляются с помощью таких мелких лабораторных животных, как мыши и крысы, поэтому возникает вопрос об этических проблемах международного характера. В связи с этим актуальным является применение искусственных моделей животных, что позволит сократить количество используемых животных. В ранее проведенных исследованиях были изготовлены гомогенные монолитные тестовые объекты и проведены их дозиметрические испытания. Были определены параметры и материалы печати для наиболее точной имитации биологических тканей. В данном исследовании предлагается использовать методы трехмерного изготовления для разработки и изготовления гетерогенных объектов из различных материалов, что позволит создавать фантомы с высокой точностью за короткий срок. В работе был разработан и изготовлен дозиметрический фантом самца крысы. Были проведены его томографические и дозиметрические испытания. Была показана возможность изготовления дозиметрических фантомов мелких лабораторных животных методами трехмерной печати.

*Ключевые слова:* дозиметрия, дозиметрический фантом, 3D-печать, метод послойного наплавления, плечные дозиметры, дозное распределение, компьютерная томография, гамма-аппарат.

**DOI:** 10.26583/vestnik.2023.282

### ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день онкологические заболевания являются одной из самых актуальных проблем в мире. В России они занимают второе место по смертности [1] после болезней сердечно-сосудистой системы. Из-за этого возникает необходимость в разработке новых методов лечения злокачественных опухолей. В большинстве случаев для лечения злокачественных новообразований применяются методы лучевой терапии [2], которые основаны на использовании ионизирующего излучения (ИИ). Однако влияние ИИ может оказывать также пагубный эффект и на здоровые ткани и органы, близко расположенные к злокачественному очагу, в связи с чем проводят дозиметрическое планирование лучевой нагрузки.

В последнее время все чаще ведется разработка новых методов лучевой терапии, которые с высокой точностью адаптируют дозовое поле

к форме опухоли для меньшего риска здоровым тканям. Для ввода новых терапевтических методик в клиническую практику необходимо провести ряд доклинических исследований с использованием таких мелких лабораторных животных, как мыши и крысы, для оценки радиобиологического эффекта ИИ. Однако проведение доклинических исследований с использованием лабораторных животных обязывает проведение исследований *in-vivo*, следовательно, к подобным экспериментам накладываются требования по минимизации количества животных и уменьшению их страданий.

Помимо этого при интерпретации полученных результатов доклинических исследований необходимо учитывать проведение дополнительных манипуляций с животными, например проведение компьютерной томографии в диагностических целях, или ввод анестетиков, так как такие процедуры могут приводить к изменению роста опухолевых новообразований [3].

## РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФАНТОМА МЕЛКОГО ЛАБОРАТОРНОГО ЖИВОТНОГО, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

Использование фантомов мелких лабораторных животных позволило бы снизить количество используемых животных на различных этапах доклинических исследований.

Дозиметрические фантомы лабораторных животных представляют собой искусственные модели, которые могут быть применены для численной дозиметрической оценки взаимодействия ИИ с биологическими тканями животных. Наиболее распространенные на сегодняшний день фантомы лабораторных животных [4] представляют собой тканезквивалентные гомогенные цилиндрические объекты упрощенной геометрии или же гетерогенные цилиндрические объекты с вставками разной плотности, имитирующими отдельные виды тканей и органов. Подобные фантомы не предполагают использование различных дозиметрических устройств одновременно и не могут обеспечить достоверное распределение поглощенной дозы при взаимодействии с ИИ [5]. Поэтому встает вопрос о создании фантомов, которые будут повторять геометрические размеры и имитировать анатомически точный набор биологических тканей и органов животного с точки зрения взаимодействия с ИИ.

Для создания подобных фантомов могут быть применены современные технологии трехмерной печати (3D), которые уже зарекомендовали себя во многих областях от науки до здравоохранения [6].

Ранее авторами уже был апробирован метод изготовления гетерогенных тканезквивалентных объектов для оценки взаимодействия ИИ с веществом [7, 8]. Полученные результаты показали возможность использования технологий трехмерной печати для разработки и создания дозиметрических фантомов. Помимо этого используемые материалы в 3D-печати позволяют модифицировать их свойства для более точной имитации биологических тканей.

Поэтому целью данной работы стали разработка и радиационные испытания фантома мелкого лабораторного животного, изготовленного методами трехмерной печати.

### 1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

#### 1.1. Разработка объемных цифровых моделей мелкого лабораторного животного

Для создания фантома был выбран самец крысы, как один из часто применяемых в доклинических испытаниях вид лабораторных

животных. На первом этапе исследования для разработки объемных цифровых моделей лабораторного животного были использованы реальные томографические данные исследуемого мелкого лабораторного животного. В программном обеспечении 3D Slicer [9] по данным анатомических атласов [10] и рентгеновским плотностям послойно были выделены такие некоторые ткани и органы грызуна, как мягкие ткани, костные ткани, легкие, головной мозг и спинной мозг.

Далее полученные цифровые поверхности органов и тканей были преобразованы в трехмерную модель формата STL для дальнейшего использования в 3D-печати. На рис. 1 представлена разработанная цифровая объемная модель грызуна.

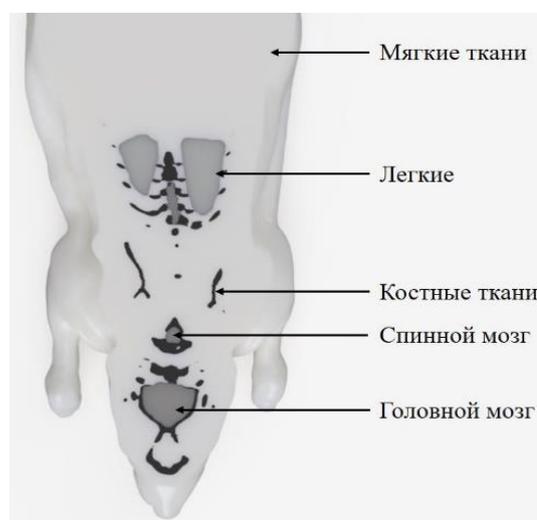
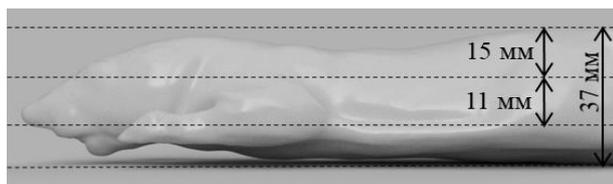


Рис. 1. Цифровая модель мелкого лабораторного животного

#### 1.2. Размещение дозиметрического оборудования в фантоме

В программе Autodesk Fusion 360 [11] объемная модель мелкого лабораторного животного была разделена на три слоя разной толщины: верхний – 15 мм, средний – 11 мм, нижний – 11 мм. Данное разделение модели на слои обусловлено расположением критических органов животного. На рис. 2 представлена схема разделения трехмерной модели грызуна.

В данной работе используются пленочные дозиметры Gafchromic EBТ3 [12]. Данные дозиметры предназначены для измерения поглощенных доз ИИ. Пленочный дозиметр состоит из двух слоев толщиной по 125 мкм и активным слоем толщиной 28 мкм [12, 13].



**Рис. 2.** Схема разделения модели мелкого лабораторного животного для размещения плечных дозиметров в областях интереса

### 1.3. Изготовление дозиметрического фантома методом послойного наплавления

В работе используется технология 3D-печати – метод послойного наплавления [6]. Данный метод основан на том, что филамент подается на нагревательный блок, где нагревается и плавится до нужной температуры и выдавливается из сопла на рабочий стол, формируя трехмерный объект согласно цифровым исходным данным. Коэффициент заполнения определяет количество материала в детали, с его помощью можно изменять физическую плотность объекта. Ранее модель мелкого лабораторного животного была преобразована в формат пригодный для 3D-печати – STL. В программном обеспечении PrusaSlicer был сгенерирован G-код, код необходимый для 3D-принтера, в котором содержатся параметры изготовления объекта, температуры нагрева сопла и рабочей области и т.д.

Далее для печати необходимо было подобрать материалы, имитирующие биологические ткани лабораторного животного в отношении их взаимодействия с ИИ и оптимальные параметры работы 3D-принтера. В программе RadiAnt DICOM Viewer [14] по томографическим данным животного были определены рентгеновские плотности или индексы Хаунсфилда. Под шкалой индексов Хаунсфилда принимают шкалу линейного ослабления излучения по отношению к дистиллированной воде [15]. В табл. 1 представлены полученные значения.

**Таблица 1.** Значения индексов Хаунсфилда для различных тканей мелкого лабораторного животного

Биологическая ткань	Индексы Хаунсфилда, HU
Мягкие ткани	$-14 \pm 17$
Костные ткани	$738 \pm 78$
Легкие	$-948 \pm 12$
Головной мозг	$25 \pm 9$
Спинальный мозг	$67 \pm 15$

Сравнения полученные значения индексов Хаунсфилда для биологических тканей со зна-

чениями индексов Хаунсфилда для образцов, изготовленных с помощью 3D-печати, в дальнейшем были определены материалы и параметры печати, которые соответствуют значениям биологических тканей животных.

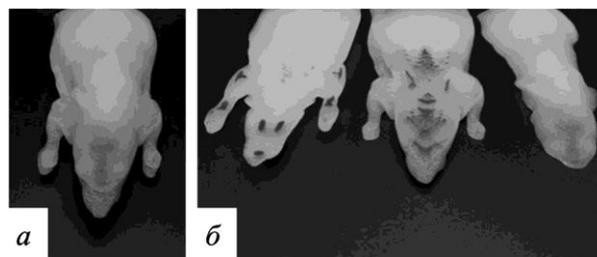
В данной работе в качестве материала 3D-печати был выбран натуральный PLA-пластик (полилактид). PLA-пластик неприхотлив в работе и легко модифицируется с различными примесями. В ранее проведенных исследованиях [7, 8, 16–18] были разработаны филаменты (PLA + 30 % Cu), которые наиболее точно имитировали костные ткани по отношению их взаимодействия с ИИ. Исходя из этого, были подобраны материалы и параметры печати для изготовления фантома мелкого лабораторного животного. В табл. 2 приведены используемые материалы и коэффициенты заполнения изделия материалом при печати для различных тканей и органов.

**Таблица 2.** Материалы и параметры печати

Биологическая ткань	Материал	Коэффициент заполнения, %
Мягкие ткани	PLA	100
Костные ткани	PLA + 30 % Cu	100
Легкие	–	0
Головной мозг	PLA	95
Спинальный мозг	PLA	95

Далее, используя 3D-принтер Original Prusa i3 MK3s [19], был изготовлен фантом мелкого лабораторного животного, состоящий из отдельных элементов в соответствии с рис. 2.

На рис. 3 показан изготовленный фантом мелкого лабораторного животного.



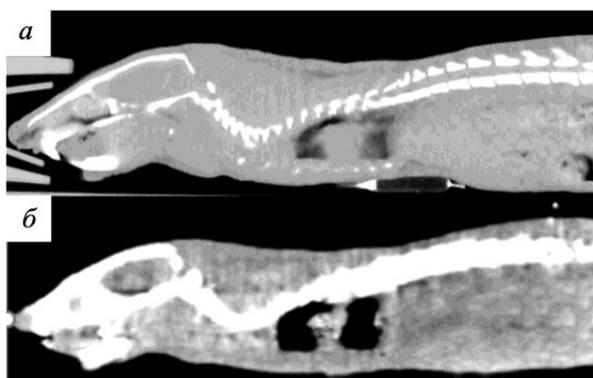
**Рис. 3.** Внешний вид фантома мелкого лабораторного животного, изготовленного методом послойного наплавления: а – фантом в сборке; б – фантом по слоям

Для определения соответствия геометрических параметров и индексов Хаунсфилда изготовленного макета фантома грызуна реальным данным животного было проведено томографическое исследование макета фантома.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

### 2.1. Томографическое исследование изготовленного фантома

На следующем этапе работы с помощью компьютерного томографа Siemens Somatom Emotion 6 [20] было проведено томографическое исследование макета фантома мелкого лабораторного животного, изготовленного с помощью технологии трехмерной печати. На рис. 4 представлены сагиттальные проекции оригинальных томографических данных грызуна и изготовленного дозиметрического фантома.

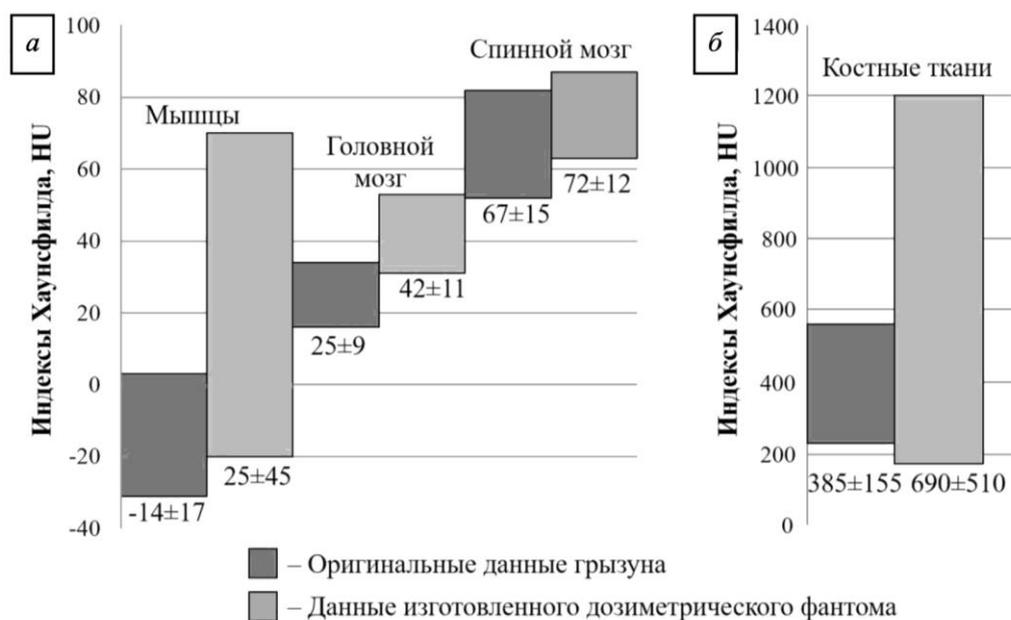


**Рис. 4.** Сагиттальные проекции компьютерной томографии: *а* – оригинальные данные грызуна; *б* – данные изготовленного дозиметрического фантома

Из рис. 4 видно, что форма и структура изготовленного фантома аналогична исходным томографическим данным грызуна. Также было проведено сравнение поперечных и продольных размеров в различных точках. Поперечные размеры изготовленного фантома в области грудной клетки составили 37.7 и 38.8 мм для исходных данных. Максимальная длина изготовленного объекта составила 144.5 и 146.5 мм для исходных данных. Было определено, что различия в геометрии мелкого лабораторного животного и изготовленного фантома находятся в пределах 3 %.

Для определения соответствия отдельных элементов фантома биологическим тканям грызуна с точки зрения взаимодействия с ИИ было проведено томографическое исследование изготовленного фантома. На рис. 5 приведены полученные средние значения индексов Хаунсфилда и их среднеквадратичные отклонения для разных тканей в программном обеспечении RadiAnt DICOM Viewer [14].

По результатам (рис. 5) видно, что все значения индексов Хаунсфилда для элементов изготовленного макета совпадают с соответствующими данными биологических тканей грызуна в пределах среднеквадратичного отклонения.



**Рис. 5.** Значения индексов Хаунсфилда для тканей лабораторного животного и элементов изготовленного макета: *а* – для мягких тканей; *б* – для костных тканей

## 2.2. Дозиметрические испытания макета фантома мелкого лабораторного животного на гамма-терапевтическом аппарате

В системе дозиметрического планирования XiO 5.1 были созданы планы облучения фантома мелкого лабораторного животного для области головы и области грудной клетки. Облучение проводилось на гамма-терапевтическом аппарате Theratron Equinox 80 [21]. Облучение проводилось с размером поля  $5 \times 5 \text{ см}^2$  в динамическом режиме, для области головы использовалась одна арка  $90\text{--}270^\circ$ , для области грудной клетки – две арки  $235\text{--}355^\circ$  и  $135\text{--}5^\circ$ . Предписанная доза составила 2.0 Гр в изоцентре.

На рис. 6 схематично представлены параметры облучения для области головы и области грудной клетки.

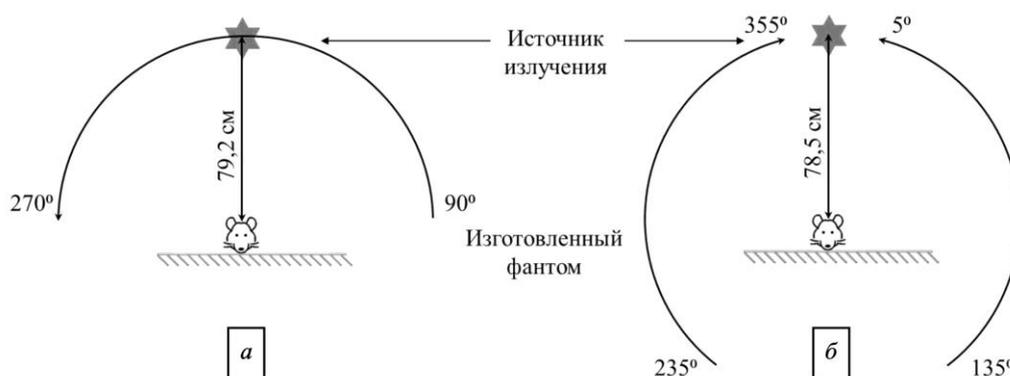


Рис. 6. Схема облучения для области: а – головы; б – грудной клетки

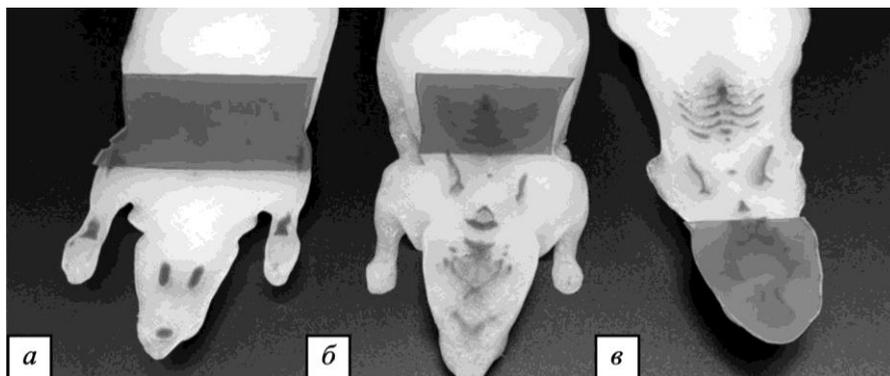


Рис. 7. Расположение дозиметрических пленок в изготовленном макете грызуна в области: а – грудной клетки на глубине 26 мм; б – грудной клетки на глубине 15 мм; в – головы на глубине 15 мм

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении исследований было определено, что разработанный с помощью трехмерной печати дозиметрический фантом мелкого лабораторного животного успешно прошел томографические и дозиметрические испытания.

В ходе томографических испытаний изготовленного макета фантома грызуна были опре-

делены значения индексов Хаунсфилда для элементов, имитирующих биологические органы и ткани, полученные данные совпали с данными грызуна в пределах среднеквадратичного отклонения. Также определено, что точность геометрических размеров напечатанных элементов фантома с реальными томографическими данными грызуна лежит в пределах 3 %.

Для верификации плана облучения были использованы дозиметрические пленки Gafchromic EBT3 [12]. На рис. 7 представлено расположение пленок в области головы на глубине 15 мм от поверхности фантома, в области грудной клетки на глубинах 15 и 26 мм от поверхности фантома.

Согласно плану облучения, максимальная предписанная доза в области головы для первого слоя (15 мм) составила 1.98 Гр; в области грудной клетки для первого слоя (15 мм) – 1.97 Гр, для второго слоя (26 мм) – 1.85 Гр. Экспериментальные данные, полученные с помощью дозиметрических пленок Gafchromic EBT3, совпали с планом облучения в пределах неопределенности пленочного дозиметра, который составляет 5 % [13].

## РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФАНТОМА МЕЛКОГО ЛАБОРАТОРНОГО ЖИВОТНОГО, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

В результате дозиметрических испытаний макета фантома мелкого лабораторного животного на гамма-терапевтическом аппарате с использованием пленочных дозиметров были получены значения поглощенных доз, которые совпадают с планом облучения в пределах погрешности дозиметра.

По результатам данной работы можно сказать, что выбранные материалы и параметры печати позволяют имитировать реальные органы и ткани мелкого лабораторного животного с точки зрения взаимодействия с ИИ.

Разработанный с помощью технологии трехмерной печати гетерогенный дозиметрический фантом мелкого лабораторного животного может быть использован для проведения доклинических исследований в области лучевой терапии.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 23-79-01232).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Каприн А.Д., Старинский В.В., Шахазодова А.О. Злокачественные новообразования в 2019 г. М.: МНИОИ им. П.А. Герцена, филиал ФГБУ «НМИЦ радиологии» Минздрава России, 2020. 252 с.
2. Gerber D.E., Chan T.A. Recent advances in radiation therapy // *American family physician*, 2008. V. 78. № 11. P. 1254–1262.
3. DeWerd L.A. The phantoms of medical and health physics. Berlin: Springer, 2014. 290 p.
4. Mouse Phantom. Pre-clinical CT Phantoms. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.leadstestobjects.com/index.php/phantom/mousephantom/> (дата обращения: 19.06.2023).
5. Tillner F., Thute P., Löck S., Dietrich A., Fursov A., Haase R., Enghardt W. Precise image-guided irradiation of small animals: a flexible non-profit platform // *Physics in Medicine & Biology*, 2016. V. 61. № 8. P. 3084.
6. Canessa E. Fonda, C., Zennaro M., Deadline N. Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development // *Low-Cost 3D Printing*, 2013. V. 11. № 1.
7. Stuchebrov S.G. Bulavskaya, A.A., Cherepennikov Y.M., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A. Development of the patient-specific phantom of the human arm part using 3D printing // *Radiotherapy and Oncology*, 2021. V. 161. P. 1309–1310.
8. Bulavskaya A., Cherepennikov Y., Gavrikov B., Grigorieva A., Grigoriev E., Miloichikova I., Stuchebrov S. Applicability of poly (styrene-butadiene-styrene) for three-dimensional printing of tissue-equivalent samples // *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2022. V. 9. № 5. P. 399–404.
9. 3D Slicer image computing platform [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.slicer.org/> (дата обращения: 05.07.2023).
10. Ноздрачев А.Д., Поляков Е.Л. Анатомия крысы (лабораторные животные). СПб.: Лань, 2001. 159 с.
11. Autodesk Fusion 360 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (дата обращения: 05.07.2023).
12. GAFCHROMIC EBT3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://gafchromic.ru/docs/EBT-3.pdf> (дата обращения: 05.07.2023).
13. Marroquin E.Y.L., Herrera Gonzalez J.A., Camacho Lopez M.A., Barajas J.E.V., Garcia-Garduño O.A. Evaluation of the uncertainty in an EBT3 film dosimetry system utilizing net optical density // *Journal of applied clinical medical physics*, 2016. V. 17. № 5. P. 466–481.
14. RadiAnt DICOM Viewer [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.radiantviewer.com/ru/> (дата обращения: 05.07.2023).
15. DenOtter T.D., Schubert J. Hounsfield Unit. StatPearls Publishing LLC, Treasure Island (FL), 2019.
16. Grigorieva A.A., Bulavskaya A.A., Miloichikova I.A., Cherepennikov Y.M., Stuchebrov S.G. Determination of the test-samples electron density via dual energy computer tomography // *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. V. 1843. № 1. P. 012021.
17. Miloichikova I., Bulavskaya A., Cherepennikov Y., Gargioni E., Grigorieva A., Stuchebrov S., Wegner M. Development of a digital three-dimensional rodent model for production of small laboratory animal phantoms // *European journal of nuclear medicine and molecular imaging*, 2021. V. 48. P. S577.
18. Stuchebrov S.G., Bulavskaya A.A., Cherepennikov Y.M., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A., Gargioni E. Making a copy of conventional anthropomorphic phantom section by 3D printing // *European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging*, 2020. V. 47. P. 313–314.
19. Original Prusa I3 MK3 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://educube.ru/products/3d-printer-original-prusa-i3-mk3-sobranny/> (дата обращения: 05.07.2023).
20. Siemens Somatom Emotion 6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://radio-med.ru/makers/kt/4-sreznnye-kt/kompyuternyy-tomograf-siemens-somatom-emotion-6/> (дата обращения: 05.07.2023).
21. Theratron Equinox 80 [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://www.theratronics.ca/product\\_equinox.html](http://www.theratronics.ca/product_equinox.html). (дата обращения: 05.07.2023).

## RADIATION TESTING OF A SMALL LABORATORY ANIMAL PHANTOM CREATED BY FUSED FILAMENT FABRICATION

A.A. Grigorieva<sup>1,\*</sup>, A.A. Bulavskaya<sup>1</sup>, E. A. Bushmina<sup>1</sup>, V.A. Kuyvalaynen<sup>1</sup>, I. A. Miloichikova<sup>1,2</sup>, S.G. Stuchebrov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

<sup>2</sup>Cancer Research Institute, Tomsk National Research Medical Center, Russian Academy of Science, Tomsk, 634009, Russia

\*e-mail: agrigorieva@tpu.ru

Received October 16, 2023; revised October 16, 2023; accepted October 24, 2023

In order to validate new radiotherapeutic techniques, a large number of studies using ionizing radiation are required. Such studies are often carried out using small laboratory animals, such as mice and rats, that is cause the ethical questions of the international scientific community. In this regard, the application of artificial animal models is relevant. It is allow to reduce the number of animals used. In previous studies, homogeneous monolithic test objects were fabricated and dosimetric tests were performed. 3D-printing parameters and materials were determined for the most accurate imitation of biological tissues. This study proposes to use fused filament fabrication techniques for design and creation of heterogeneous objects from different materials, which will allow the fabrication of phantoms with high accuracy in a short period of time. In this work, the male rat dosimetric phantom was designed and created. Its tomographic and dosimetric tests were carried out. The possibility of manufacturing dosimetric phantoms of small laboratory animals by fused filament fabrication methods was shown.

**Keywords:** dosimetry, dosimetric phantom, 3D printing, fused filament fabrication method, dosimetry film, dose distribution, computed tomography, gamma machine

### REFERENCES

1. Kaprin A.D., Starinskij V.V., Shahazadova A.O. Zlokachestvennye novoobrazovaniya v 2019 godu [Malignant neoplasms in 2019]. M.: MNIOI im. P.A. Gercena, filial FGBU «NMIC radiologii» Minzdrava Rossii Publ., 2020. 252 p.
2. Gerber D.E., Chan T.A. Recent advances in radiation therapy. American family physician, 2008. Vol. 78. No. 11. Pp. 1254–1262.
3. DeWerd L.A. The phantoms of medical and health physics. Berlin, Springer, 2014. 290 p.
4. Mouse Phantom. Pre-clinical CT Phantoms. Available at: <https://www.leadstestobjects.com/index.php/phantom/mousephantom/> (accessed 19.06.2023).
5. Tillner F., Thute P., Löck S., Dietrich A., Fursov A., Haase R., Enghardt W. Precise image-guided irradiation of small animals: a flexible non-profit platform. Physics in Medicine & Biology, 2016. Vol. 61. No. 8. P. 3084.
6. Canessa E. Fonda C., Zennaro M., Deadline N. Low-cost 3D printing for science, education and sustainable development. Low-Cost 3D Printing, 2013. Vol. 11. No. 1.
7. Stuchebrov S.G. Bulavskaya, A.A., Cherepennikov Y.M., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A. Development of the patient-specific phantom of the human arm part using 3D printing. Radiotherapy and Oncology, 2021. Vol. 161. Pp. 1309–1310.
8. Bulavskaya A., Cherepennikov Y., Gavrikov B., Grigorieva A., Grigoriev E., Miloichikova I., Stuchebrov S. Applicability of poly (styrene-butadiene-styrene) for three-dimensional printing of tissue-equivalent samples. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2022. Vol. 9. No. 5. Pp. 399–404.
9. 3D Slicer image computing platform. Available at: <https://www.slicer.org/> (accessed 05.07.2023).
10. Nozdrachev A.D., Polyakov E.L. Anatomiya krysy (laboratornye zhivotnye) [Anatomy of a rat (laboratory animals)]. Saint Petersburg: Lan' Publ, 2001. 159 p.
11. Autodesk Fusion 360. Available at: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription> (accessed 05.07.2023).
12. Gafchromic (EBT2, EBT3, HD-810 et al.). Available at: <https://gafchromic.ru/catalog.php> (accessed 05.07.2023).
13. Marroquin E.Y.L., Herrera Gonzalez J.A., Camacho Lopez M.A., Barajas J.E.V., Garcia-Garduño O.A. Evaluation of the uncertainty in an EBT3 film dosimetry system utilizing net optical density. Journal of applied clinical medical physics, 2016. Vol. 17. No. 5. Pp. 466–481.
14. RadiAnt DICOM Viewer. Available at: <https://www.radiantviewer.com/ru/> (accessed: 05.07.2023).
15. DenOtter T.D., Schubert J. Hounsfield Unit. StatPearls Publishing LLC, Treasure Island (FL), 2019.

РАДИАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ ФАНТОМА МЕЛКОГО ЛАБОРАТОРНОГО  
ЖИВОТНОГО, ИЗГОТОВЛЕННОГО МЕТОДАМИ ТРЕХМЕРНОЙ ПЕЧАТИ

16. Grigorieva A.A., Bulavskaya A.A., Miloichikova I.A., Cherepennikov Y.M., Stuchebrov S.G. Determination of the test-samples electron density via dual energy computer tomography. Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021. Vol. 1843. No. 1. Pp. 012021.

17. Miloichikova I., Bulavskaya A., Cherepennikov Y., Gargioni E., Grigorieva A., Stuchebrov S., Wegner M. Development of a digital three-dimensional rodent model for production of small laboratory animal phantoms European journal of nuclear medicine and molecular imaging, 2021. Vol. 48. P. S577.

18. Stuchebrov S.G., Bulavskaya A.A., Cherepennikov Y.M., Grigorieva A.A., Miloichikova I.A., Gargioni E. Making a copy of conventional anthropomorphic phantom section by 3D printing. European Journal of Nuclear Medicine and Molecular Imaging, 2020. Vol. 47. Pp. 313–314.

19. Original Prusa I3 MK3. Available at: <https://educube.ru/products/3d-printer-original-prusa-i3-mk3-sobranny/> (accessed: 05.07.2023).

20. Siemens Somatom Emotion 6. Available at: <https://radio-med.ru/makers/kt/4-sreznyie-kt/kompyuternyy-tomograf-siemens-somatom-emotion-6/> (accessed: 05.07.2023).

21. Theratron Equinox 80. Available at: [http://www.theratronics.ca/product\\_equinox.html](http://www.theratronics.ca/product_equinox.html) (accessed: 05.07.2023).