

УДК 004.588

## ИССЛЕДОВАНИЕ РЕНТГЕНОВСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФАНТОМА ТОРСА ЧЕЛОВЕКА

© 2019 г. А. А. Роженцов<sup>1</sup>\*, А. А. Баев<sup>1</sup>, А. О. Евдокимов<sup>1</sup>, Г. И. Смирнова<sup>1</sup>, Ю. Н. Ендальцев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
“Поволжский государственный технологический университет”, Йошкар-Ола, Россия

\*E-mail: RozhencovAA@volgatech.net

Поступила в редакцию 20.06.2019 г.

После доработки 20.07.2019 г.

Принята к публикации 27.08.2019 г.

Для тестирования программного обеспечения при разработке системы интраоперационной навигации на основе 3D-моделирования с технологией дополненной реальности были отобраны материалы для фантома торса человека. Значения рентгеновской плотности по шкале Хаусфилда подобранных эквивалентов тканей находятся в диапазонах, соответствующих определённым группам биологических тканей. Достоверность исследования была доказана путем сравнения 3D-моделей фантома, изготовленного из данных материалов, и реального пациента.

DOI: 10.1134/S0367676519120251

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из задач при разработке и производстве системы интраоперационной навигации для проведения малоинвазивных лапароскопических операций в реальном времени на основе использования 3D-моделирования и технологии дополненной реальности является тестирование программного обеспечения, в т. ч. оценка работоспособности алгоритмов и методик сегментации и визуализации органов человека по результатам топографического сканирования [1].

Для решения этой задачи необходимо использовать фантом, имитирующий брюшную полость человека. Анализ существующих фантомов в данной области показал, что большинство промышленных образцов фантомов для магнитно-резонансных и компьютерных томографов ведущих европейских фирм [2–4] предназначены для имитации тела человека при проведении дозиметрических измерений, использующихся в стоматологии, флюорографии и лучевой терапии. Однако существуют и такие фантомы, которые предназначены для контроля диагностического качества изображения при диагностике печени, поджелудочной железы, селезенки, почек и надпочечников, а также головного мозга. Все они представляют собой пластины, сферы, диски и предназначены для имитации отдельных видов биологических тканей и различного вида опухолей, но нет таких, которые имитировали бы целиком части тела с входящими в нее всеми видами биологических тканей, т.е. нет фантома торса человека. Зарубежные фан-

томы Gammex также позволяют имитировать только отдельные виды биологических тканей [5].

Что касается имитации частей тела, в данном случае торса человека, то существуют только анатомические сборно-разборные модели в виде манекенов для медицинских симуляторов для отработки действий при реанимации, различного рода инъекций и других медицинских процедур, например, антропоморфный органотропный фантом тела человека АРДФ-10 “РОМАН” [6]. Но для апробации программного обеспечения и моделировании органов человека по результатам топографического сканирования они не подходят.

Обзор существующих материалов, имитирующих биологические ткани человека и наблюдаемых с помощью томографов, показал, что они выполнены из доступных материалов, таких как оргстекло, различные гели и водно-эквивалентные компоненты типа “твердая вода” и т.п. [3–5], поэтому могут быть выполнены на хорошо работающем предприятии, в данном случае промышленном партнере по изготовлению системы интраоперационной навигации. Но полный перечень материалов, соответствующих отдельным элементам брюшной полости человека нигде не представлен. Поэтому актуальной является задача поиска материалов, имитирующих биологические ткани торса человека.

Целью данного исследования является подбор материалов для разработки и изготовления физической модели торса человека, при проведении исследований на томографе и 3D-моделирования

**Таблица 1.** Рентгеновская плотность различных биологических тканей в единицах Хаунсфилда

Ткань	Плотность, НУ	Ткань	Плотность, НУ
Кость, в среднем	+1000	Серое вещество мозга	+20–40
Свернувшаяся кровь	+55–75	Кровь	+13–18
Селезенка	+50–70	Спинальная жидкость	+15
Печень	+40–70	Опухоль	+5–35
Поджелудочная железа	+40–60	Желчный пузырь	+5–30
Почка	+40–60	Вода	0
Аорта	+35–50	Орбиты	–25
Мышцы	+35–50	Жир	–100
Белое вещество мозга	–36–46	Легкие	–150–400
Мозжечок	+30	Воздух	–1000
Хрящевые ткани	+150–400		

в системе интраоперационной навигации. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: определить требования к имитаторам биологических материалов, подобрать материалы и оценить их достоверность.

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для того, чтобы материалы фантома были “узнаваемы” томографами как биологические ткани, они должны обладать рентгеновскими и магнитно-резонансными свойствами соответствующими типам тканей. Рентгеновские и магнитно-резонансные свойства материалов определяются в виде рентгеновской плотности и оцениваются в единицах шкалы Хаунсфилда [7, 8]. Значения данной плотности для различных групп биологических тканей представлены в табл. 1 [8].

Известно, что диапазон единиц шкалы денситометрических показателей (англ. Hounsfield units), соответствующих степени ослабления рентгеновского излучения анатомическими структурами организма, составляет от –1024 до +3071, т.е. 4096 чисел ослабления. Средний показатель в шкале Хаунсфилда (0 НУ) соответствует плотности воды, отрицательные величины шкалы соответствуют воздуху и жировой ткани, положительные – мягким тканям, костной ткани и более плотному веществу (металл). В связи с тем, что “рентгеновскую плотность” – усредненное значение поглощения тканью излучения – для каждой ткани точно определить невозможно, всегда указывается диапазон значений [5].

В медицинской и технической литературе не представлена информация о рентгеновской плотности каких-либо эквивалентов тканей, тем более соответствующая отдельным видам биологических тканей. Поэтому для их определения использовался экспериментальный метод подбора в условиях, максимально приближенных к условиям проведе-

ния реальных обследований пациентов, т.е. на компьютерном томографе или на магнитно-резонансном томографе. Основным критерием выбора является то, что значения рентгеновской плотности отобранных материалов находятся в диапазоне значений всех видов биологических материалов (кости, печень, мышцы и т.п.).

Достоверность результатов измерений была получена при использовании метода сравнения [9]. С целью исследования проведено сравнение рентгеновской плотности выбранных материалов на нескольких томографах. Сравнение результатов на разных по принципу действия томографах позволит повысить точность измерений, и уменьшить систематическую погрешность, т. к. процедуры калибровки томографов различны.

На начальном этапе проведено предварительное пилотажное исследование с использованием выбранных материалов, из которых изготовлен фрагмент фантома торса человека, и выполнено его сканирование на томографе. По результатам сканирования выполнено 3D-моделирование и проведено сравнение результатов модели фантома и реального пациента.

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Подбор материалов для проведения исследований производился на основании следующих критериев:

- учет технологических возможностей индустриального партнера;
- применяемые материалы должны сохранять свои свойства при комнатной температуре в течение достаточно длительного времени, не подвергаться деградации, быть устойчивыми к воздействию микроорганизмов;
- механические свойства материалов должны быть близки к свойствам биологических тканей.

Кроме того, важно учитывать, что для возможности исследования на томографах тканевые эк-

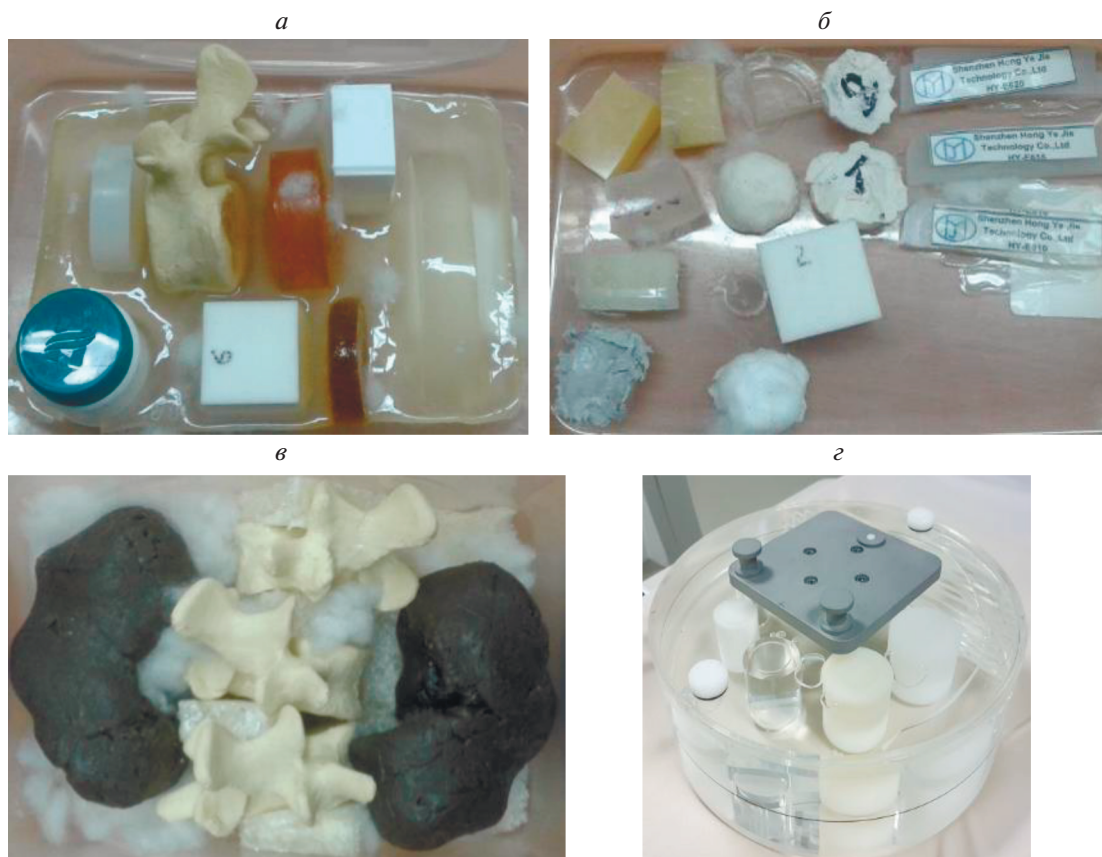


Рис. 1. Исследуемые образцы.

виваленты должны обладать магнитно-резонансными свойствами [10].

На основании указанных критериев для проведения исследований были предварительно отобраны подобные материалы, обладающие магнитно-резонансными свойствами, в виде разного вида гелей, силиконов, клеев, парафина и др. Для исследования одна часть образцов материалов была представлена в виде отдельных фрагментов (рис. 1а, 1б, 1г), а другая – в виде фантомов органов человека, таких как почки и позвоночник (рис. 1в).

Целью исследования было определение рентгеновской плотности по шкале Хаунсфилда, как единственно-возможной для измерения магнитно-резонансных свойств материалов, применяемых в томографии. Для этого использовался томограф в клинической Республиканской больнице Марий Эл (г. Йошкар-Ола). В связи с тем, что полученные результаты измерений сильно зависят от калибровки томографа, для обеспечения достоверности результатов использовался метод сравнения, при котором были проведены повторные измерения на двух томографах г. Новосибирска.

Исследования свойств материалов были проведены с использованием оборудования Центра

коллективного пользования научным оборудованием “Клинические нейронауки и нейровизуализация” Федерального государственного бюджетного научного учреждения “Научно-исследовательский институт физиологии и фундаментальной медицины” (НИИФФМ). Исследования проводили на компьютерном мультиспиральном томографе Toshiba Aquilion 16 и магнитно-резонансном томографе General Electric Discovery MR750W. Сводные результаты исследований рентгеновских плотностей выбранных материалов по шкале Хаунсфилда на компьютерных томографах представлены в табл. 2. Как видно из представленных данных, рентгеновские плотности исследуемых материалов различаются незначительно и в основном находятся в диапазоне, характерном для биологических тканей.

Как видно из представленных результатов, в качестве основы для изготовления жировой ткани в твердом виде может использоваться парафин или воск, для изготовления жировой ткани в полужидкой консистенции может использоваться вазелиновое масло. Для изготовления тканей почки пригоден герметик; для костей – клей ВК9, смешанный с диоксидом титана в различных соотношениях; для хрящевой ткани – виксинт

**Таблица 2.** Значения рентгеновской плотности исследуемых материалов по шкале Хаусфилда

№	Материал	Плотность, HU на томографе Toshiba Aquilion 16	Плотность, HU на томографе Philips
1	Виксинт ПК68+нефрас	-8-6	77
2	Силикон универсальный + диоксид титана 30	375	435
3	Силикон RTV2, плотность 20 Shore A	220	210
4	Силикон RTV2, плотность 10 Shore A (Образец 1)	185	125
5	Силикон универсальный белый	20	-18
6	Силикон универсальный + диоксид титана 10	245	235
7	Силикон RTV2, плотность 15 Shore A.	215	182
8	Силикон RTV2, плотность 10 Shore A (Образец 2)	185	165
9	Герметик серый	665	710
10	Клей ПУ2	65	35
11	Герметик универсальный + ПМС100 + герметик универсальный прозрачный	10	10
12	Клей BK9 + диоксид титана (Образец 1/Образец 2)	300 (125)	320 (125)
13	Пентэласт 710A	205	292
14	Желатин + вода	125	125
15	Виксинт ПК68	35	65
16	Воск	-	-180
17	Парафин	-	-180
18	Силиконовое масло	-	-80

ПК68; для мышечной ткани – виксинт ПК68. Некоторые расхождения между измеренными значениями рентгеновской плотности материалов на разных марках компьютерных томографов могут объясняться, с одной стороны, различиями алгоритмов обработки данных, с другой – испарением растворителей, что, по всей видимости, характерно для смеси виксинта ПК68 и нефраса.

Для сравнения были проведены исследования выбранных образцов материалов на магнитно-резонансном томографе General Electric Discovery MR750W (г. Новосибирск). Полученные данные свидетельствуют о возможности применения ряда исследуемых материалов для разработки фанто-

мов, исследуемых на магнитно-резонансных томографах.

Следующей задачей исследования является определение достоверности полученных результатов. Из перечня выбранных материалов изготовлен фрагмент фантома торса человека в виде почек и позвоночника, проведено сканирование его на томографе. Разработанное специальное программное обеспечение [11] позволило выполнить 3D-моделирование данного фрагмента фантома. Результаты сканирования почек на МР томографе General Electric Discovery MR750W и 3D-моделирования представлены на рис. 2а.



**Рис. 2.** Результаты построения 3D моделей фантома и реального пациента: а – построение 3D модели фантома по данным МР томографа General Electric Discovery MR750W, б – построение 3D модели фантома по данным КТ томографа Toshiba Aquilion 16; в – построение 3D модели реального пациента по данным КТ томографа.

Адекватность полученной модели была проверена при сравнении 3D-модели фантома и модели реального пациента. Для этого использовался фантом почек и позвоночника. Результаты 3D-моделирования представлены на рис. 2б, 2в, из которого видно, что 3D-модель и модель, построенная для реального пациента, показывают адекватность соотношения рентгеновских плотностей материалов, используемых для изготовления фантома.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, подобраны эквиваленты тканей для изготовления фантома, имитирующего торс человека. Проведенные томографические исследования показали, что значения рентгеновской плотности этих материалов находятся в диапазонах, допустимых для определенного типа биологических материалов по шкале Хаусфилда. В частности, показано, что для изготовления тканей почки пригоден акриловый герметик; для костей – клей ВК9, смешанный с диоксидом титана в различных соотношениях; для хрящевой и мышечной тканей – виксинт ПК68. На основании полученных данных изготовлен фрагмент торса человека в виде почек и позвоночника. Проведено томографическое сканирование данного фрагмента фантома и выполнено его 3D-моделирование. Сравнение полученных 3D-моделей фрагмента фантома и реального пациента показало, что результаты исследования достоверны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, Государственное задание по проекту № 8.8017.2017/БЧ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов М.Н., Шубин А.А., Найдёнов К.М., Дербёнев А.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 12. С. 1680; Morozov M.N., Shubin A.A., Naidenov K.M., Derbenev A.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 12. P. 1525.
2. [http://www.doza.ru/catalog/CT\\_phantom/237/](http://www.doza.ru/catalog/CT_phantom/237/).
3. [http://www.doza.ru/catalog/MRI\\_phantoms/](http://www.doza.ru/catalog/MRI_phantoms/).
4. <http://gsafe.ru/catalog/phantoms/>.
5. [http://www.fluitech.com.ua/assets/files/gammex/Radiation\\_Oncology\\_Catalog05\\_06](http://www.fluitech.com.ua/assets/files/gammex/Radiation_Oncology_Catalog05_06).
6. <https://www.radek.ru/fantoms/ardf-10/>.
7. <https://www.lvrach.ru/1998/06/4527151/>.
8. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии. Уч. пособие. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. 132 с.
9. Petraikin A.V., Sergunova K.A., Semenov D.S. et al. // Med. Visualization. 2017. V. 6. P. 130.
10. <https://www.xrayprotocol.com/densitometricsharakteristiki>.
11. Грунин Л.Ю., Роженцов А.А., Халимов М. // Изв. РАН. Сер. физ. 2018. Т. 82. № 12. С. 1676; Grunin L.Yu., Rozhentsov A.A., Halimov M. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2018. V. 82. № 12. P. 1522.