

П.О. Румянцев¹, А.А. Трухин^{1,2}, К.А. Сергунова³, Я.И. Сирота¹, Н.М. Макарова^{1,2}, А.А. Бубнов²,
Д.С. Семенов³, Е.С. Ахмад³

ФАНТОМЫ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ

¹ Национальный медицинский исследовательский центр эндокринологии Минздрава России, Москва

² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

³ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий Департамента здравоохранения Москвы, Москва

Контактное лицо: А.А. Трухин, alexey.trukhin12@gmail.com

РЕФЕРАТ

Разработка фантомов для ядерной медицины основана на последовательном описании вычислительной и экспериментальной биологических моделей объекта исследования. Вычислительные фантомы применяют для описания геометрии объекта исследования и моделирования распространения зондирующего излучения, тогда как экспериментальные фантомы служат для целей проведения тестов контроля качества оборудования и стандартизации протоколов функциональных исследований. Распространённым примером является дозиметрическое планирование радионуклидной терапии и посттерапевтическая сцинтиграфия с ¹³¹I. В данном обзоре приведен перечень методов описания вычислительных и экспериментальных фантомов. Также приведены примеры существующих фантомов, созданных для задач ядерной медицины.

Ключевые слова: ядерная медицина, тераностика, математический фантом, экспериментальный фантом, 3D-печать, количественная дозиметрия

Для цитирования: Румянцев П.О., Трухин А.А., Сергунова К.А., Сирота Я.И., Макарова Н.М., Бубнов А.А., Семенов Д.С., Ахмад Е.С. Фантомы в ядерной медицине. Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2020;65(2):62-7.

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-2-62-67

Введение

Исторически термин «фантом» использовали для обозначения экспериментальной модели человеческого тела в большинстве литературных источников [1]. Однако этот термин также применяют для обозначения объектов, с помощью которых проводят контроль качества и калибровку оборудования. Кроме того, фантомами называют математические модели геометрических и физических структур организма [2].

С 1960-х гг. радиологи предложили более ста моделей экспериментальных фантомов человеческого тела для дозиметрии внешнего и внутреннего облучения. Экспериментальный фантом имитирует геометрические, физические, а в некоторых исполнениях и физиологические особенности человеческого тела или его части в соответствии с методом физического воздействия (электромагнитное излучение, элементарные частицы, звук и т.д.).

На сегодняшний день существует большое многообразие видов фантомов. Они производятся из разных материалов и имеют разные параметры. Фантомы бывают гомогенными, гетерогенными и антропоморфными. Но наибольшее распространение получили фантомы из воды и близких к ней по химическому и физическому составу материалов (наличие схожего эффективного атомного номера и электронной плотности) [3]. Также применяются фантомы, смоделированные посредством вычислительной техники в специальных средах программирования, например, GATE.

В задачи ядерной медицины, в которых задействованы фантомы, входит фундаментальное изучение распределения введенного радиофармацевтического препарата (РФП), расчет лучевой нагрузки на ткани организма.

Основным измерительным оборудованием в ядерной медицине на данный момент считают системы однофотонной эмиссионной компьютерной (ОФЭКТ) и позитронной эмиссионной (ПЭТ) томографии. Часто ОФЭКТ и ПЭТ комбинируют с системой рентгеновской компьютерной томографии, реже совмещают с системой магнитно-резонансной томографии. Актуален вопрос стандартизации количественных характеристик изображений при проведении диагностических процедур, для чего требуется разработка стандартных образцов [4].

Фантомы — неотъемлемая часть системы менеджмента качества измерительного оборудования. Их применение совместно с средствами автоматизации обработки изображений ядерной медицины позволяют количественно (оператор-независимо) определить и гарантировать точность измеренных параметров распределения РФП в организме.

В разработке фантомов участвуют врачи-специалисты и инженерно-технический персонал, непосредственно вовлеченный в работу с оборудованием.

С развитием технологий медицинской визуализации, станций пост-обработки изображений, ростом вычислительной мощности персональных компьютеров, применение математических фантомов стало доступно непосредственно в медицинских учреждениях.

Математические фантомы для ядерной медицины

Появление первых компьютеров и методов Монте-Карло-моделирования при описании распространения элементарных частиц в 1940-х гг. позволило рассчитывать лучевую нагрузку на ткани организма с применением математических фантомов.

Каждый математический фантом определяет не только внешние особенности всего человеческого тела, но также включает в себя математическое описание внутренних структур организма [5]. Каждый орган описывают с указанием геометрии и физических характеристик. Данный подход весьма выгоден с точки зрения его универсальности, эффективности, точности и радиационной безопасности. Поэтому с момента их появления в 1960-х годах использование математических фантомов человека становится все более популярным в областях радиационной защиты, визуализации, дистанционной лучевой и радионуклидной терапии.

Математическое описание геометрии (табл. 1) эволюционно проходило через следующие способы описания: геометрические примитивы; воксельное представление; неоднородные рациональные B-сплайны [6]. К геометрическим примитивам относятся: параллелепипед, эллипсоид, цилиндр, конус и т.д. Воксельные фантомы наиболее часто встречаются в медицинской визуализации: трансмиссионный (РКТ), эмиссионный (ОФЭКТ/КТ) и эхолокционный (МРТ) методы. При таком описании объект делит на множество одинаковых параллелепипедов (вокселей), в которых количественно содержится результат решения специфичной конкретному методу обратной томографической задачи.

Для точного математического описания поверхности произвольной формы применяют неоднородный рациональный B-сплайн (NURBS). Основная идея NURBS заключается в «математически» гладком, наиболее точном представлении объекта исследования.

Для описания физики распространения электромагнитных волн, элементарных частиц, ультразвука используют аналитические модели и Монте-Карло-моделирование, в котором заложены статистические, математические и алгоритмические основы распространения и взаимодействия элементарных частиц [7].

Математические фантомы применяют для целей обоснования медицинского облучения, например, при проведении радиойодтерапии, радиосиноэктомии,

что очень близко переплетается с задачами радиомикки, радиогеномики [8].

Экспериментальные фантомы для ядерной медицины

Разработка и применение экспериментальных фантомов в ядерной медицине связаны, прежде всего, с необходимостью контроля и поддержания требуемого уровня качества получаемой диагностической информации в процессе эксплуатации оборудования. В данном случае под фантомом понимается физический объект, состоящий из конструктивных элементов с заданными физическими характеристиками, позволяющих моделировать определенные свойства или параметры биологических объектов. На сегодняшний день по функциональному назначению можно выделить три основные группы фантомов:

- для оценки и контроля эксплуатационных параметров ПЭТ- и ОФЭКТ-сканеров;
- для проведения калибровки и оценки точности и воспроизводимости показателей, используемых при количественном анализе, например, стандартизованного показателя накопления (SUV);
- тканеэквивалентные антропоморфные фантомы для оптимизации протоколов исследований.

Фантомы для контроля характеристик ПЭТ- и ОФЭКТ-сканеров

Первые две группы фантомов используются при проведении технических испытаний в рамках программы обеспечения контроля качества (Quality Assurance), включающей в себя как периодический технический контроль, проводимый специализированными организациями, так и контроль на постоянство параметров, осуществляемый квалифицированными сотрудниками медицинских организаций с использованием специально разработанных фантомов либо рекомендованными государственными образцами.

Подробное описание методологии проведения испытаний ПЭТ- и ОФЭКТ-систем приводится в соответствующих зарубежных руководствах Международного агентства по атомной энергетике (МАГАТЭ, IAEA) [9,10] и Национальной ассоциации электротехнической промышленности (NEMA), а также в стандартах Международной электротехнической комиссии (МЭК, IEC) [11], ряд из которых переведен на русский язык [12].

Для оценки фракции рассеяния излучения и потери счета ПЭТ-систем предлагается использовать фантом в виде сплошного цилиндра из полиэтилена с плотностью 0,9 г/см³, внутри которого параллельно оси цилиндра на расстоянии 45 ± 1 мм от центра имеется отверстие диаметром 6,4 ± 0,2 мм для размещения полиэтиленовой трубки с линейным источником ¹⁸F (рис. 1а). Представленная конструкция позволяет измерять относительную чувствительность системы позитронно-эмиссионных томографов к рассеянному излучению, а также оценивать скорость эквивалентного счета шума (NECR), которая является существенным параметром для оценки производительности

Таблица 1

Эволюция описательной геометрии в ядерной медицине

The evolution of descriptive geometry in nuclear medicine

		
1960-е гг.	1980-е гг.	2000-е гг.
Объектная дозиметрия	Воксельная дозиметрия	Воксельная дозиметрия с учетом эффекта частичного объема
Фигуры вращения	Воксельные представления при условии однородности объекта	Неоднородные рациональные B-сплайны

ПЭТ-сканера и влияние времени простоя системы и генерации случайных событий на нескольких уровнях активности источника.

Совершенно иное техническое решение реализовано при создании фантома для оценки томографической чувствительности ПЭТ-систем. В данном случае источником сигнала служит цилиндрическая трубка, заполняемая дистиллированной водой с растворенным в ней радиоизотопом ^{18}F заданной активности. Контролируемый параметр определяется методом регрессионного анализа исходя из зависимости скорости истинных совпадений от коэффициента ослабления материала для пяти алюминиевых коаксиальных втулок длиной 700 мм, толщиной стенки 12,5 мм и внешним диаметром 9,5, 12,5, 15,9, 19,1 мм соответственно (рис. 1б).

Особое место среди представленного испытательного оборудования занимают фантомы для оценки качества изображения. В их составе имеются полые сферические объекты для имитации «горячих» (при условии заполнения радиоактивными веществами) и «холодных» очагов. Полученные изображения подобных фантомов позволяют оценить такие параметры

качества, как относительный контраст и неравномерность «фонового» сигнала. Кроме того, данный фантом позволяет определить точность количественной оценки концентрации радиоактивного изотопа путем построения функций зависимости значений коэффициента восстановления от размера очага. Представленный на рис. 1в фантом позволяет моделировать очаги диаметром и $37,0 \pm 1,0$, $28,0 \pm 1,0$, $22,0 \pm 1,0$, $17,0 \pm 1,0$, $13,0 \pm 0,5$, $10,0 \pm 0,5$ мм.

Принципиальным отличием ОФЭКТ от ПЭТ является энергия излучения источника. Тогда как ПЭТ-изображение формируется аннигиляционным излучением с энергией 511 кэВ, то в ОФЭКТ принято говорить о диапазоне энергий от 80 до 360 кэВ [13]. Также важно акцентировать внимание на способе формирования изображения. Основные элементы в ОФЭКТ-системах — кристалл и коллиматор. От их геометрии зависит чувствительность и пространственное разрешение [14]. Поэтому задачи контроля качества и стандартизация протоколов исследования сводятся к изучению параметров комбинации кристалла с коллиматором. Применяется универсальный наливной фантом (рис. 2) с цилиндрическими и сфери-

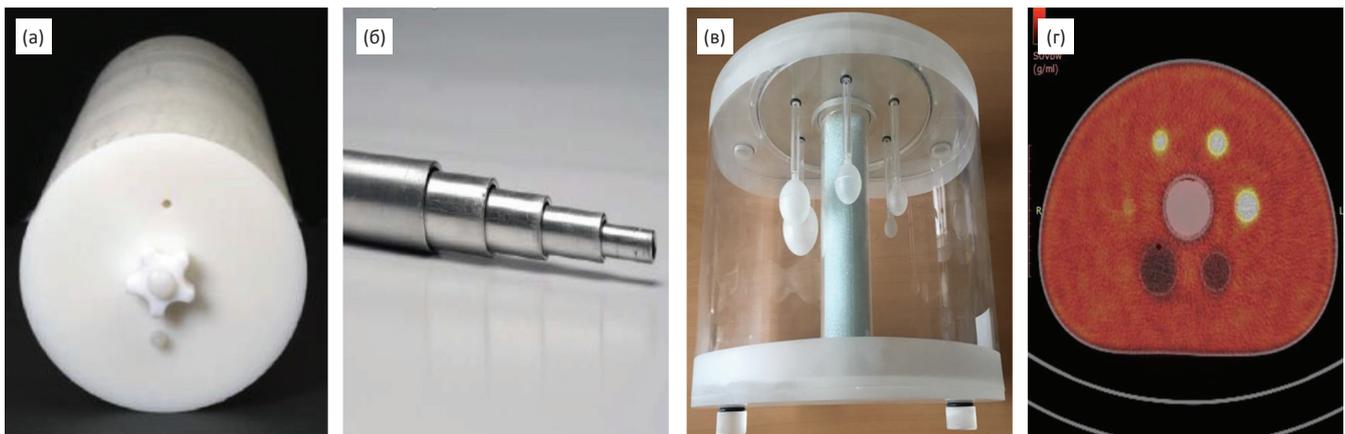


Рис. 1. Фантомы для контроля характеристик ПЭТ систем: (а) — оценки фракции рассеяния и потери счета; (б) — оценки томографической чувствительности; (в), (г) — контроля качества изображения (внешний вид и полученное изображение соответственно)

Fig. 1. Phantoms for monitoring the characteristics of PET systems: (a) — estimates of the scattering fraction and loss of count; (б) — assessment of tomographic sensitivity; (в), (г) — image quality control (appearance and image obtained, respectively)

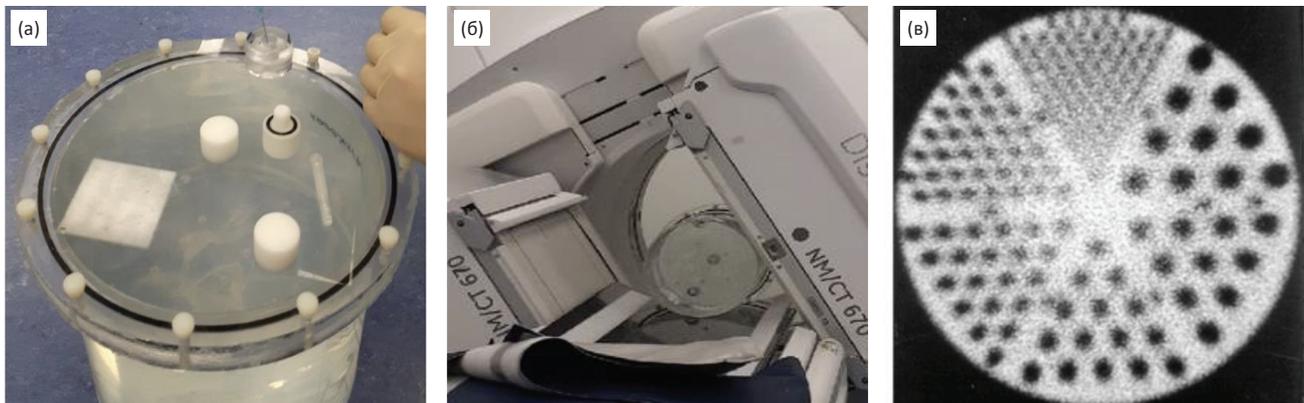


Рис. 2. Фантом для контроля характеристик ОФЭКТ-систем: (а) — подготовка фантома к исследованию; (б) — сбор проекций; (в) — реконструированное изображение фантома на станции обработки изображения

Fig. 2. A phantom for monitoring the characteristics of SPECT systems: (a) — preparing a phantom for research; (б) — collection of projections; (в) — reconstructed phantom image at the image processing station

чекскими вставками для определения равномерности восстановления распределения источника, контраста, пространственного разрешения, чувствительности, шума, линейности, а также тестирования специализированного программного обеспечения [15–17]. При работе с различными радионуклидами необходимо контролировать градуировку спектрометрического тракта ОФЭКТ, для этого проводят тест с гамма-источником излучения известной энергии.

Тканеэквивалентные антропоморфные фантомы

Третья группа — антропоморфные фантомы, изготавливаемые из тканеэквивалентных (композитных) материалов, обеспечивающих поглощение и рассеяние рентгеновского и гамма-излучения в диапазоне энергией от 10 до 3000 кэВ, соответствующее реальным органам и тканям и моделирующее “фооновую” область. При их изготовлении используют эквивалентные по электронной плотности материалы: эпоксидные смолы для имитации костных структур плотностью 1,3 г/см³, парафин с разным содержанием NaCl для имитации мягких и жировой тканей (1,04 г/см³ и 0,9 г/см³ соответственно), пористое дерево для имитации легочной ткани (0,26 г/см³) и пр.

Для имитации источника излучения («горячих» очагов) на этапе проектирования выделяют области,

которые в дальнейшем изготавливают из состава с легированным радионуклидом (табл. 2), либо наполняют на этапе проведения эксперимента раствором с интересующим радионуклидом, например, ^{99m}Tc, ¹³¹I.

К достоинствам антропоморфных фантомов можно отнести анатомически правильное расположение интересующих органов и точное воспроизведение ослабления и рассеяния ионизирующего излучения. Данные преимущества позволяют использовать подобные фантомы не только для качественной оценки получаемых изображений, но также и для оптимизации протоколов исследований. Так, например, фантом, моделирующий грудную клетку (рис. 3а), может быть использован для оценки диагностической ценности получаемых ПЭТ-изображений при проведении ПОЭТ молочной железы.

В Японии компанией Kyoto Kagaku Co, LTD, был создан и выпущен на рынок антропоморфный фантом Whole Body Phantom PBU-60 (рис. 3б) [18]. Данный фантом обладает практически полным набором внутренних органов человека, полный диапазон суставных движений. Мягкие ткани и органы таких фантомов изготовлены из смол на основе уретана, синтетические кости изготовлены из эпоксидной смолы, суставы — из эпоксидной смолы и уретана с углеродным волокном, винты и крепления изготовлены из поликарбоната. Похожий фантом был изготовлен в Германии

Таблица 2

Основные характеристики радионуклидов для фантомов
The main characteristics of doped radionuclides

Радионуклид	Период полураспада, год	Основная линия, кэВ	Выход гамма-линии, %	Система	Применение
²² Na	2,6	1274,5	99,9	ПЭТ	Калибровка, контроль качества
⁵⁷ Co	0,74	122,06	85,6	ОФЭКТ	Контроль качества
⁶⁸ Ge/ ⁶⁸ Ga	0,74	511	100	ПЭТ/ОФЭКТ	Контроль качества, калибровка, нормирование, коррекция ослабления
¹³³ Ba	10,55	356	62,05	ОФЭКТ	Контроль качества, коррекция ослабления
¹³⁷ Cs	30,08	661,7	85,1	ПЭТ	Калибровка, коррекция ослабления
¹⁵³ Gd	0,66	103,18	21,1	ОФЭКТ	Коррекция ослабления, контроль качества

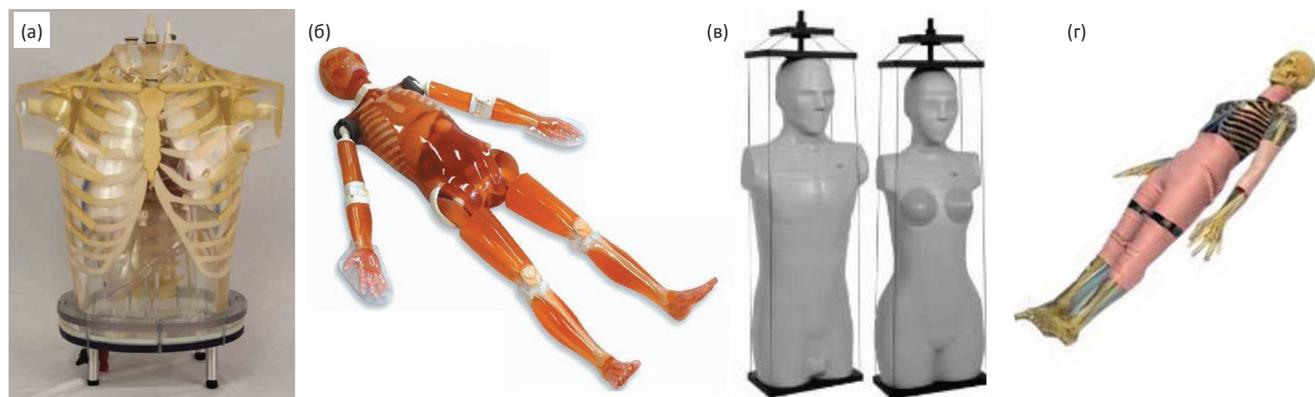


Рис. 3. Примеры тканеэквивалентных антропоморфных фантомов: (а) — Myocardial SPECT Phantom HL (Kyoto Kagaku co, LTD); (б) — Whole Body Phantom PBU-60 (Kyoto Kagaku co, LTD); (в) — ELSA; (г) — PIXY
Fig. 3. Examples of tissue-equivalent anthropomorphic phantoms: (a) — Myocardial SPECT Phantom HL (Kyoto Kagaku co, LTD); (б) — Whole Body Phantom PBU-60 (Kyoto Kagaku co, LTD); (в) — ELSA; (г) — PIXY



Рис. 4. Фантом, изготовленный на 3D-принтере, с единицами радиационной плотности по Хаунсфилду (HU)
Fig. 4. Phantom manufactured on a 3D printer with units of radiation density according to Hounsfield (HU)

компанией Erler Zimmer и назван Modular Full Body X-Ray Phantom [19], в Италии — компанией ELSA (рис. 3в), в Америке — компанией Radiology Support Devices (RDS) и назван PIXY (рис. 3г) [20].

Современные фантомы также изготавливают на 3D принтерах, например Objet Connex 350, Stratasys, MN, по технологии PolyJet, которая аналогична струйной печати с нанесением слоев из жидких фотополимеров, которые далее отвердевают под воздействием ультрафиолета (рис. 4) [21].

Заключение

Приведенные в настоящей работе данные раскрывают актуальность применения фантомов в ядерной медицине, основные принципы их проектирования, производства и доступности на рынке.

Перспективным направлением развития остаётся оценка лучевой нагрузки на пациента, персонал,

контроль и калибровка характеристик эмиссионных томографов, создание антропоморфных фантомов с использованием новых технологий.

Остаётся не до конца решенным вопрос стандартизации измерений с целью обмена медицинской информации.

Ввиду роста вычислительной мощности персональных компьютеров математические фантомы активно внедряют в клиническую практику для обеспечения дозиметрии объектов интереса.

Современные направления эмиссионной томографии, такие как радиомика и радиогеномика, требуют количественной характеристики распределения изотопа в тканях организма человека, что возможно только при разработке и соблюдении программ обеспечения качества, неотъемлемой частью которых является разнообразие фантомов.

Phantoms for Nuclear Medicine

P.O. Rumiantsev¹, A.A. Trukhin^{1,2}, K.A. Sergunova³, Ya.I. Sirota¹, N.M. Makarova^{1,2}, A.A. Bubnov², D.S. Semenov³, E.S. Ahmad³

¹ National Medical Research Centre of Endocrinology, Moscow, Russia, alexey.trukhin12@gmail.com

² National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³ Research and Practical Clinical Center of Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow Healthcare Department, Moscow, Russia

ABSTRACT

The nuclear medicine phantom development is based on the step by step description of the computational and experimental biological object model. Computational phantoms are used for geometry of the object description and simulate physics of particle interactions with matter, while experimental phantoms are used for quality control tests and standardization of functional research protocols. Common examples are the dosimetry planning of radionuclide therapy and post-therapeutic scintigraphy with ¹³¹I. This review provides a list of methods for computational and experimental phantoms. Examples of existing phantoms created for the nuclear medicine tasks are also given.

Key words: nuclear medicine, theranostics, phantom, mathematical phantom, experimental phantom, 3D print, quantitative dosimetry

For citation: Rumiantsev PO, Trukhin AA, Sergunova KA, Sirota YaI, Makarova NM, Bubnov AA, Semenov DS, Ahmad ES. Phantoms for Nuclear Medicine. Medical Radiology and Radiation Safety. 2020;65(2):62-7. (In Russ.).

DOI: 10.12737/1024-6177-2020-65-2-62-67

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Larry A. The Phantoms of Medical and Health Physics. Springer. 2014; 290.
2. Sidney Y. Handbook of Materials Modeling. Springer. 2005; 2965.
3. Климанов ВА. Радиобиологическое и дозиметрическое планирование лучевой и радионуклидной терапии. Часть 1: учеб. пособие для вузов.— М.: НИЯУ МИФИ, 2011. 604 с. [Klimanov VA. Radiobiological and Dosimetric Planning in Radionuclide Therapy. Part 1: Student book. Moscow. 2011; 604. (in Russ.)].
4. Camoni L. Quality Control of Nuclear Medicine Instrumentation and Protocol Standardisation. EANM 2017; 168.
5. Xu XG. Handbook of Anatomical Models for Radiation Dosimetry. CRC Press. 2009; 757.
6. Bailey L, Willowson K. An Evidence-Based Review of Quantitative SPECT Imaging and Potential Clinical Applications. J Nucl Med. 2013;54(83):9.
7. Jan S, Santin G, Strul D. Users Guide V8.0 Introduction [internet source] URL:http://wiki.opengatecollaboration.org/index.php?title=Users_Guide_V8.0&oldid=910.
8. Sun R, Limkin EJ, Derclé L. Computational medical imaging (radiomics) and potential for immuno-oncology. Journal de la Societe francaise de radiotherapie oncologique. 2017; 648-54.
9. International Atomic Energy Agency. Quality Assurance for SPECT Systems. IAEA Human Health Series. Vienna, Austria. 2009;6:263.
10. International Atomic Energy Agency. Planning a Clinical PET Centre. IAEA Human Health Series. Vienna, Austria. 2010;11:160.
11. Busemann E, Płachcńska A, Britten A. Routine quality control recommendations for nuclear medicine instrumentation. Eur J Nucl Med Mol Imaging. 2010;37:662-71.
12. International Atomic Energy Agency. Clinical PET/CT Atlas: A Casebook of Imaging in Oncology. IAEA Human Health Series. IAEA. 2015; 201.
13. Khalil M, Tremoleda J, Bayomy T. Molecular SPECT Imaging: An Overview. Int J Mol Imaging. 2011; 15.
14. Арсвольд Д. Эмиссионная томография: основы ПЭТ и ОФЭКТ. Учеб. пособие для выпускников вузов. М.: Техносфера, 2009. 599 с. [Arsvold D. Emission tomography: basics of PET and SPECT. Technosphere. 2009; 599. (in Russ.)].
15. Agostinelli AG, Smolen SD, Nath RA. New water-equivalent plastic for dosimetry calibration. Med Phys. 1992;19:774.
16. Tello VM, Taylor RC, Hanson WF. How water equivalent are water-equivalent plastics for output calibration of photon and electron beams? Med Phys. 1995;22:1177-89.
17. Селиванов МГ, Александрук АГ, Четвериков СФ, Пономарев АС. О возможности использования пластинчатого тканеэквивалентного фантома для верификации дозового распределения в лучевой терапии. Казань: Бук. 2017;30-3. [Selivanov MG, Aleksandruk AG, Chetverikov SF. On the possibility of using a lamellar tissue equivalent phantom to verify the dose distribution in radiation therapy. Buk. 2017: 30-3. (in Russ.)].
18. Whole Body Phantom PBU-60 [internet source]. URL: <https://www.kyotokagaku.com/products/detail03/ph-2b.html>.
19. Modular Full Body X-Ray Phantom [internet source]. URL: <https://www.erler-zimmer.de/shop/en/medical-simulators/x-ray-ct/10180/modular-full-body-x-ray-phantom>.
20. Anthropomorphic phantoms [internet source]. URL: <http://rsdphantoms.com/rdanth.htm>.
21. Mitsouras D, Liacouras P, Imanzadeh A. Medical 3D Printing for the Radiologist. Radiographics In Press. 2015;7:1965-87.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
Financing. The study had no sponsorship.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.
Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Поступила: 03.06.2019. **Принята к публикации:** 12.03.2020.

Article received: 03.06.2019. **Accepted for publication:** 12.03.2020.