Антропоморфные фантомы молочной железы для лучевой диагностики: научный обзор



Ю.А. Васильев, О.В. Омелянская, А.А. Насибуллина, Д.В. Леонов, Ю.В. Булгакова, Д.А. Ахмедзянова, Ю.Ф. Шумская, Р.В. Решетников

Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Фантомы молочной железы применяются для разработки, валидации и усовершенствования методов лучевой диагностики. В визуализации молочной железы антропоморфные модели используются для валидации, оценки и оптимизации новых методов диагностики заболеваний молочной железы, а также для контроля качества диагностических систем, совершенствования клинических протоколов и алгоритмов реконструкции изображений. Ключевым требованием к фантомам для решения этих задач является реалистичная имитация органа.

В обзоре описаны существующие на настоящий момент варианты фантомов молочной железы для лучевой диагностики и процесса их создания.

Поиск литературы, соответствующей теме обзора, производился в базах данных PubMed, eLibrary, а также в поисковой системе Google Scholar. Всего в обзор включено 72 статьи и 13 тезисов материалов конференций.

Все виды фантомов молочной железы можно разделить на два вида: вычислительные и физические. Вычислительные, в свою очередь, подразделяются на группы в зависимости от типа первичных данных: на основе математических моделей, из образцов тканей, с использований изображений медицинской визуализации молочной железы пациентки. Физические фантомы классифицируются в зависимости от способа изготовления: литья, 3D-печати или послойного формирования с использованием контрастных веществ. Основными преимуществами вычислительных фантомов являются универсальность, эффективность, точность и безопасность, а также возможность генерировать большие объёмы виртуальных данных. Физические фантомы позволяют получать наиболее реалистичные диагностические изображения без участия пациентов и проводить неограниченное число лучевых исследований.

Ключевые слова: молочная железа; 3D-печать; фантомы; фантомы для лучевой диагностики; лучевая диагностика; научный обзор.

Как цитировать:

Васильев Ю.А., Омелянская О.В., Насибуллина А.А., Леонов Д.В., Булгакова Ю.В., Ахмедзянова Д.А., Шумская Ю.Ф., Решетников Р.В. Антропоморфные фантомы молочной железы для лучевой диагностики: научный обзор // Digital Diagnostics. 2023. Т. 4, № 4. С. 569–592. DOI: https://doi.org/10.17816/DD623341

Рукопись получена: 14.11.2023

Рукопись одобрена: 27.11.2023

Опубликована online: 06.12.2023



REVIEWS

DOI: https://doi.org/10.17816/DD623341

Anthropomorphic breast phantoms for radiology imaging: a review

Yuriy A. Vasilev, Olga V. Omelyanskaya, Anastasia A. Nasibullina, Denis V. Leonov, Julia V. Bulgakova, Dina A. Akhmedzyanova, Yuliya F. Shumskaya, Roman V. Reshetnikov

Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Phantoms are used to validate diagnostic imaging methods or improve the skills of medical professionals. For instance, they allow conducting an unlimited number of imaging studies during medical training, assessing image quality, optimizing radiation dose, and testing novel techniques and equipment. Researchers in breast imaging use anthropomorphic models to validate, assess, and optimize new methods for diagnosing breast diseases. Such models also facilitate control over the quality of diagnostic systems, help optimize clinical protocols, and improve image reconstruction algorithms. Realistic simulation of the breast tissue is essential to address the challenges of advancing X-ray mammary gland studies. The review aimed to describe phantoms currently available for diagnostic imaging and the way they were fabricated. In this literature review, PubMed, eLIBRARY, and Google Scholar databases were screened for relevant articles. Thus, 72 articles and 13 conference papers were included. The study two major types of breast phantoms: computational and physical. Specifically, computational phantoms are classified into subgroups depending on the data they use. These include mathematical models, tissue samples, and medical images of the breast. The classification of the physical phantoms is based on their manufacturing process: casting silicone-like substances, 3D printing with resins and plastics, or printing on paper using X-ray contrast ink. Computational phantoms are generally advantageous with respect to versatility, efficiency, precision, and safety and allow the generation of large amounts of virtual data. Physical phantoms provide the most realistic diagnostic images without the need for a patient and allow performing an unlimited number of radiological studies.

Keywords: breast, 3D printing, phantoms, imaging phantoms, diagnostic radiology, literature review.

To cite this article:

Vasilev YuA, Omelyanskaya OV, Nasibullina AA, Leonov DV, Bulgakova JV, Akhmedzyanova DA, Shumskaya YuF, Reshetnikov RV. Anthropomorphic breast phantoms for radiology imaging: a review. *Digital Diagnostics.* 2023;4(4):569–592. DOI: https://doi.org/10.17816/DD623341

Received: 14.11.2023

Accepted: 27.11.2023

Published online: 06.12.2023



DOI: https://doi.org/10.17816/DD623341

用于放射诊断的仿真乳房模型:科学综述

Yuriy A. Vasilev, Olga V. Omelyanskaya, Anastasia A. Nasibullina, Denis V. Leonov, Julia V. Bulgakova, Dina A. Akhmedzyanova, Yuliya F. Shumskaya, Roman V. Reshetnikov

Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russian Federation

简评

乳房模型被用于放射诊断方法的开发、验证和改进。在乳腺成像中,仿真模型被用于验证、 评估和优化诊断乳腺疾病的新方法。仿真模型还被用于诊断系统的质量控制、临床协议和图 像重建算法的改进。为了解决这些问题,对仿真模型的关键要求是它作为逼真的器官模拟 器。

本综述旨在介绍目前可用于放射诊断的乳腺模型变体,并描述其制作过程。

我们在PubMed、eLIBRARY和Google Scholar数据库中搜索了与本综述主题有关的文献。共有72篇文章和13份会议纪要被纳入该综述。

所有类型的乳房模型可分为两类:计算模型和物理模型。计算模型又根据原始数据的类型分为几组:基于数学模型、来自组织样本、使用患者乳房的医学成像图像。物理模型则根据制作方法分为几组:铸造、3D打印或使用造影剂的逐层制作。计算模型的主要优势在于多功能性、高效性、准确性和安全性,以及生成大量虚拟数据的能力。物理模型可提供最逼真的诊断图像,无需患者参与,并对其可进行无限量的放射检查。

关键词:乳腺; 3D打印; 模型; 用于放射诊断的模型; 放射诊断; 文献综述。

引用本文:

Vasilev YuA, Omelyanskaya OV, Nasibullina AA, Leonov DV, Bulgakova JV, Akhmedzyanova DA, Shumskaya YuF, Reshetnikov RV. 用于放射诊断的仿真 乳房模型:科学综述. Digital Diagnostics. 2023;4(4):569–592. DOI: https://doi.org/10.17816/DD623341

收到: 14.11.2023

接受: 27.11.2023



人体模型是超声波[1]、磁共振成像(MRI)[2]和 计算机断层扫描(CT)[3]等多种医学成像模式 的关键工具。乳腺(MG)模型是评估X射线成像 系统的一个重要因素,不可行或不需要对患者进 行照射的情况下,它可以替代人体。制作用于放 射诊断的乳腺模型的目的是开发、优化和质量控 制现有的和新兴的成像系统,如宽视场数字乳腺 X射线成像(乳房造影)、数字断层合成和计算 机断层扫描。

用于X射线诊断的仿真乳腺模型既代表乳腺的 计算(数学)模型,也代表乳腺的物理模型。数 学模型是利用公式和计算对器官结构的描述。这 种方法的局限性之一是无法捕捉乳腺结构的所有 解剖学变化, 也无法确保其解剖学和放射学的 有效性。为了克服这些局限性,我们利用从乳 腺计算机断层扫描获取的分割数据集中创建了具 有不同组织类型自然分布的仿真模型,以确保高 度的真实性。自1960年以来,人们一直在尝试创 建此类仿真计算模型[4],但直到最近,由于三 维(3D)打印技术的出现,才开始出现可靠的拟 人物理模型。制作乳腺拟人实体模型的主要方法 有模塑技术、三维打印和纸质方法。在上述方法 中,三维打印技术提供了一个绝佳的机会,通过 使用其X射线特征与乳腺组织相似的材料来制作 逼真的模型。

随着断层扫描和计算机断层扫描等现代准三维和 三维成像系统的临床应用日益增多,亟需具有逼真病 人解剖结构的实体模型,以全面呈现和评估此类系 统的三维行为。此外,鉴于人工智能系统在乳房造影 图像分析中的积极和成功应用[5],使用模型将实现 放射检查的标准化,这将有助于改进人工智能算法。

搜索方法

在PubMed和eLibrary数据库中搜索了与审查主题相关的文献。所使用的搜索查询是为了最好地体现关键词和主题标题。在PubMed数据库中,我们通过查询进行了搜索: "anthropomorphic AND breast* AND (phantom* ORphantoms, imaging[mh] OR (phantomsAND imaging) OR model*) AND (diagnostic x-ray OR radiography OR mammography OR tomography)"。通过关键词"人体模型"、"乳腺"在eLibrary数据库中进行了搜索。此外,还在Google Scholar搜索系统中搜索了会议材料。

结果

搜索共发现335篇文章,但有263篇文章不符合本综述的必要标准。综述包括72篇文章和13份会议材料。

乳腺解剖

为了在X射线成像中准确模拟乳腺,需要详细 了解其解剖学和X射线特征。乳腺是一种改良的 皮肤汗腺,由管状腺泡组织、结缔组织和其他元 素组成:脂肪组织、血液和淋巴管以及神经纤 维。腺组织和脂肪组织 所占的体积最大。每个 乳腺都位于覆盖胸大肌的筋膜上,筋膜位于两侧 腋窝前线和胸骨周围线之间的III-VI肋骨水平。 乳腺还被乳腺浅筋膜的前叶和后叶包围,共同形 成腺体囊。浅筋膜附着在锁骨上,形成一条支撑 韧带。结缔组织间隔(Cooper韧带)从后小叶延 伸到乳腺深部,从前小叶延伸到皮肤。

乳腺由15-20个乳腺小叶组成,与乳头呈放射 状分布,周围有疏松的结缔组织和脂肪组织。每 个乳腺小叶都有自己的乳腺导管。在乳晕下区 域,乳腺管扩张形成乳窦(安瓿)。在这些乳窦 中,多个乳腺小叶的乳腺导管合并成较大的乳腺 导管,这些乳腺导管独立排入乳头,在乳头表面 形成单独的开口。直至安瓿的导管直径约为1毫 米,而主导管的直径在至4.5毫米之间。导管的 总长度从2厘米到4.5厘米不等。直径为1至2毫米 的小叶由导管和肺泡组成,导管和肺泡的末端是 一个共同的末端导管。这种结构被称为"末端导 管小叶单元"。

由于不同女性的腺体组织和脂肪组织的比例各 不相同,因此对于乳腺的放射学表现没有明确的 严格标准。因此,对乳腺密度类型进行了几种分 类:沃尔夫(Wolf)、BI-RADS、Tabar。表1列 出了这些分类。因此,乳腺模体建模的目的就是 研究人员选择的这些或其他分类。

在临床实践中,BI-RADS分类法被最广泛地用 于描述乳腺的X射线密度。按类型划分的乳腺组 织结构类型见图1。

数学模型和女性患者的诊断图像都可以用于模 拟乳腺的解剖结构。在这些数据的基础上,有三 种主要方法被用于制作物理拟人模型:

- 使用模塑技术;
- 单独打印不同的结构,然后组装成完整的模型;
- 打印整个模型。

乳腺三维仿真计算模型

仿真乳腺计算模型具有不同乳腺组织类型的X 射线吸收系数值的解剖学精确容积分布。创建模 型的方法可分为三种:

1) 数学建模方法。

基于数学模型的模型被设计成符合人体器官的某些物理或统计特性,例如X射线密度或某些特性的统计分布模式[6]。一些研究小组开发了基于模型的稳健虚拟乳腺模型,用于投影和断层成像[7-10]。图2展示了创建这类模型的方案。

2) 基于组织样本分析的方法。

这些模型再现了病理样本或超分辨率显微计算机 断层扫描中观察到的精细乳腺组织结构[11,12]。

3) 基于病人断层图像处理的方法。

这类模型由二维(乳房造影)或三维(CT或磁 共振成像)图像创建[13,14]。 表1。乳腺结构类型分类

类型			
Wolf分类			
N1	乳腺主要由脂肪组织构成(N=正常);对应于罹患乳腺癌症的低风险		
P1	这种类型包括脂肪组织和线性密度(扩张的导管),占乳腺的比例不超过 25%; 患乳腺癌的风险 较低		
Ρ2	线状密度(扩张的导管)占乳腺的25%以上。它们主要位于外上象限,但也可能分布在整个乳腺 (P=可见导管); 对应于乳腺癌症的高风险		
Dy	致密乳腺(Dy=发育不良);相当于罹患乳腺癌症的最高风险		
Qdy	准发育不良;这类患者包括年轻女性,她们的乳腺结构致密,但由于脂肪浸润,结构呈海绵状。		
BI-RADS分类			
a	以脂肪成分为主的乳腺,存在的纤维腺组织小于乳腺X线照片面积的25%		
b	在乳腺X光照片上,纤维腺组织灶占25%至50%的面积		
С	具有异质密度(纤维腺组织)的乳腺占乳腺X线照片面积的51%至75%		
d	非常致密的乳腺,纤维腺组织的比例超过乳腺X线照片面积的75%		
Tabar分类			
Ι	乳腺组织比例均衡,纤维组织略占优势		
II	以脂肪组织为主		
III	以脂肪组织为主,伴有乳晕后纤维组织		
IV	乳腺组织主要表现为结节性封闭		
V	纤维组织为主		

乳腺数学模型

这类模型基于使用数学方法对乳腺结构元素进行建模。这类模型全面地表现了器官形状、导管系统、Cooper韧带、胸大肌、血管、皮肤、乳房造影形态和乳腺病理。为了创建三维解剖逼真的乳腺模型,K.Bliznakova等人[15]和P.R.Bakic等人[16-18]结合使用了构造实体几何和基于体素的技术。

宾夕法尼亚大学乳腺模型

2002年,宾夕法尼亚大学的一个研究小组开发了 第一个乳腺仿真计算模型,通过对两个椭圆形区域 的大规模组织元素建模来实现:主要是脂肪组织和 主要是纤维腺组织[16,17]。这些区域由现实分布的 中尺度模型元素进行数学建模:外壳、小叶和建模的 乳腺导管。导管网络模型是利用描述树结构二分法 性质的分支矩阵实现的[18]。通过与导管造影数据的 比较,确定了乳腺导管模型的有效性。此外,还建立 了一个能可靠再现乳腺变形的压缩模型,这对于将 宾夕法尼亚大学的模型应用于二维乳房造影和乳腺 层析成像非常必要。该模型的进一步工作包括添加 精细结构和实施一种算法,以快速生成体素大小在 25-1000 µm³范围内的高分辨率仿真模型[19]。因此, 该数字人体模型的改进版应运而生[12]。

所提出的算法基于一个简化的假设,即模型的 每个体素包含一种类型的组织。这种简化导致投 影图像在不同材料区域的边界附近出现伪影,特 别是在皮肤-空气边界。为了克服这些限制,已 经提出了几种方法。其中一种方法是为较小尺寸的体素建模。然而,体素尺寸的减小增加了模型的生成时间,并对模拟模型的电子计算机的性能提出了更高的要求。另一种方法是考虑体素中不同组织的部分体积[20,21]。每个体素中的线性X射线衰减系数是通过合并与不同组织所占体素子体积成比例的衰减系数来计算的。

帕特拉斯大学乳腺模型

与此同时,帕特雷大学的一个研究小组开发 了一种乳腺仿真模型,该模型是解剖形状、导 管系统、Cooper韧带、放射组织纹理和结节的 复杂组合[15]。三维纹理模拟了脂肪、纤维和结 缔组织以及其他未明确建模的组织类型。为了获 得逼真的三维乳房造影纹理,采用了基于随机行 走(random walk)的纹理算法[10]。Cooper韧 带被模拟为一组椭圆形薄壳,随机出现在模型的 选定位置。脂肪区由Cooper韧带所包围的体积建 模。胸肌近似为一个锥形物体,而节点则以圆 形、卵形、拉长形或不规则形物体建模。

美国食品和药物管理局乳腺模型

在上述发展的基础上,美国食品和药物管理局的一个研究小组提出了一种改进的开放源代码多模态数学模型乳腺,供科学界使用[21]。 乳腺根据分析公式生成,然后进行体素离散化。 在这种情况下,每个体素具有任意大小,由一种 类型的组织组成。前表面添加了乳头和1毫米厚的皮肤层,后表面添加了支撑乳腺的肌肉层。 573



图1。根据BI-RADS 分类的乳腺组织密度类型。每张图像的上半部分是头尾投影,下半部分是内外侧投影。

在内表面,根据维诺分割法定义了腺体区。对于 每个分割后的腺体区,使用随机分支算法从乳头 开始生长导管树。每个导管树的末端分支都会添 加末端小叶导管。最初,模型内部被定义为纯腺 体组织。为了创建皮下脂肪层和小叶周围脂肪层 以及一些脂肪结构,在腺体区域内随机插入脂肪 切片。每个脂肪小叶周围都有韧带结构[22]。在 生成模型的最后阶段,还要插入其他结构,如血 管、胸肌和韧带。

OPTIMAM乳腺模型

与美国食品和药物管理局的发展同步, P. Elangovan等人[9]提出了生成准真实体素模型

的新方法,可模拟用于乳房造影和断层合成的压缩乳腺。仿真乳腺模型是通过生物仿生方法生成的,其特征和结构是从断层合成中获得的真实乳腺图像平面中提取的。这些特征和结构被用于合成乳腺的三维结构。建模过程首先是创建一个皮肤层环绕的高分辨率乳腺空白。根据从断层合成图像中提取的结构,该空白由对应于不同组织的体素填充。通过图像阈值处理,从断层扫描数据中获得整体三维形状。然后在乳腺轮廓的皮肤表面添加1.5毫米厚的"皮肤"层。内部体素被标记为脂肪或腺体组织。

然后,创建一个随机选择腺体组织片段的数据 库,用于生成腺体组织的三维矩阵,并将其置于



图2。计算乳腺模型结构示意图。

乳腺脂肪组织中。血管和Cooper韧带被建模为患 者断层扫描图像中存在的线性结构的扩展三维框 架:血管网络直径为3-4毫米,Cooper韧带网络 直径可达1-2毫米。

基于医疗数据的乳腺计算模型

多位学者[20,23,24]尝试在乳腺模型中创建 更逼真的组织分布。有学者根据三块被压缩固定 的乳腺的高分辨率分割计算机断层扫描数据(取 自三名不同的老年妇女)创建了三个基于体素的 乳腺模型[25]。这些分割后的乳腺模型能够更真 实地表现腺体组织,并对乳房造影期间的平均乳 腺剂量进行蒙特卡洛计算,以及对不同的成像技 术进行建模。

专门的乳腺计算机断层扫描系统的出现推动了 乳腺拟人计算模型的发展。这种模型由C.M.Li等 人于2009年首次开发[14]。关键步骤是创建一种 可用于处理乳腺计算机断层扫描切片和区分乳腺 组织的技术。获得的模型乳房造影图像与乳腺组 织的真实乳房造影图像相似。这种方法有一定的 局限性,因为它不能可靠地对需要更高分辨率的 小结构(Cooper韧带)进行分类。为了解决这个 问题,作者建议用数学方法表达这些结构,并进 一步将它们纳入计算的乳腺体积中。

虽然C.M.Li等人的方法保证了高度的逼真性,但 它只代表了一种乳腺模型,无法涵盖广泛的解剖学 变化。为了解决这个问题,C.M.Hsu等人[26,27] 开发了一种计算技术,可以创建大量计算机生成 的拟人 乳腺模型[14]。该技术基于渐变(一种 视觉效果,给人一种将一个物体平滑转换成另一 个物体的印象)和变形(数字图像处理过程中形 状的明显扭曲),并从放射科医生的角度展示了 生成逼真的拟人乳腺模型的能力。

为了加速基于计算机断层扫描数据的乳腺模型的开发,需要通过计算机断层扫描对乳腺进行精确的解剖学特征描述。在S.Y.Huang等人的研

究[28]提出并详细描述了乳腺的解剖特征:乳腺的形状、直径和长度,乳腺三个区域中腺体组织的比例(取决于患者的年龄和罩尺寸)。这项研究是在当时通过乳腺计算机断层扫描扫描获得的最大图像集(219张)上完成的。此外,杜克大学(Duke University)的研究小组还利用它们制作了224个虚拟乳腺模型[29,30]。作者还开发了一个应用程序来模拟不同的乳腺压缩状态,从而可以使用模型进行多模态成像。

A. Sarno等人开发了88个具有逼真腺体组织分布的乳腺计算模型,用于估计乳腺中的剂量分布和成像数据。这些模型有助于开发改进型模型,以更准确地计算放射检查中腺体的平均辐射剂量[31],并通过虚拟临床试验优化断层合成。

因此,计算模型的主要优势在于它们能够潜在 地生成大量数据[21],但这些模型是虚拟的,而 不是物理的。研究的质量(in silico)不仅取 决于虚拟模型的特性,还取决于模拟成像系统在 表现物理图像模式时的准确性。例如,在断层扫 描或乳腺计算机断层扫描中,扫描虚拟模型往往 需要详细了解诊断系统的几何形状公司专有的重 建算法。

物理仿真乳腺人体模型

在撰写本文时,3D打印技术是创建乳腺实体模型最流行的方法。三维打印技术允许选择不同的打印方法和材料,这些材料在密度、成分组成和放射性特性方面与人体组织相似。就乳腺而言,此类组织包括脂肪、腺体、肿瘤和皮肤。

1) 创建拟仿真物理模型乳腺的过程包括两个步骤:

2) 使用前几节讨论的方法之一创建乳腺的计 算模型;

使用计算模型制作乳腺物理模型。

由于现有材料并不总是具备必要的放射特 性,因此人们在开发新材料方面付出了巨大努

力[32-34]。K. Bliznakova等人的文章[35]中对 用于制造拟人模型的材料进行了广泛综述,表2列 出了用于制作乳腺模型的一些主要材料。

使用模塑技术制作的乳腺模型

CIRS BR3D乳房造影模体(CIRS公司,美国诺 福克)由D形板连接而成,这些板连接成一个整 体结构并形成一个整体模型。每块板由两种组织 等效材料组成,模拟脂肪组织和腺体组织,重量 比为50/50。两种组织等效塑料混合后形成异质 结构。通常情况下,会制作几块板,这些板可以 按不同顺序重新排列,很容易产生不同但有限的 底层组织变化。其中一块板含有微钙化物、纤 维组织和肿瘤。该模型用于图像质量研究以及 与断层合成和乳腺计算机断层扫描技术相关的 研究。在乳房造影图像上生成的结构图像虽然 边界不清晰,但看起来不如病人的图像逼真。例 如,Cooper悬韧带等小结构无法用这种技术制 作,因此不会出现在X光片上。在J. Sage等人最 近进行的一项研究中[43],研究人员发现[43]的 最新研究表明,BR3D纹理背景具有高对比度,会 在整个模型中产生高对比度伪影。此外,在断层 合成图像中,放置插入物的环形结构的轮廓清晰 可见,这会影响测量和图像分析的结果。

M. Freed等人[44]开发了一种仿真的乳腺模 型,用于放射学检查和磁共振成像。他们将蛋清 与融化的精制猪油混合,然后将所得混合物放置 在乳腺形状的罐子中。事实证明,该模型是量化 二维和三维X射线技术图像质量的有用工具。不 过,它无法模拟解剖结构,因为这些结构在模型

中看起来要比在病人体内大得多。此外,目前还 没有成熟的技术来制作具有足够腺体组织含量的 模型。

G. Ruvio等人[45]利用乳腺模具制作了用于X 射线、磁共振和超声波成像的多模态乳腺模型。 制作过程包括五个步骤,使用三种不同的 乳腺 模具:外部(重复 乳腺的形状)、真皮和内部 纤维腺。外部乳腺模具复制了根据患者磁共振成 像数据得出的仰卧位人体乳腺的形状。制造皮肤 元件的主要材料是聚乙烯醇冷冻凝胶。脂肪结构 由水和蜂蜡的混合物表示,而纤维腺体、肿瘤和 肌肉则由含有液体(水、甘油、苯扎氯铵)和干 燥(琼脂、SiC、Al₂O₃)成分混合物的琼脂表 示。目前存在的限制是由于模拟脂肪的材料不 适合弹性变形而无法压缩模型。此外,这种模 型存放时间不能超过一周,因为容易滋生细菌和 变干。这导致肿瘤和纤维腺组织之间的对比度不 足。尽管制作模仿三种模式重要成像参数的组织 的工作非常复杂,但研究表明,参考属性和测量 属性之间具有高度的相似性。在没有活体病人或 尸体材料的情况下,这种模型可用于多模态交叉 校准和培训。

集成球形元件的乳腺模型

这是下一小节所述方法的一个特例。由组织等效 材料制成的各种尺寸的球形元件被浸入均匀的下层 组织中[46-48]。这些模型被广泛用于乳房造影的图 像质量评估和辐射剂量测量,以及双能乳房造影、 对比增强双能乳房造影、断层扫描和计算机断层扫 描等新乳房造影技术的扫描程序优化。鲁汶天主教

人体组织	材料	密度,g/cm ³
	超高分子量高密度聚乙烯[36]	0.94
	含丁二烯和苯乙烯的丙烯腈塑料[32]	1.02
叱��如如	聚乙烯PE-12[37]	N/A
庙 肋组织	Formlabs Clear Resin透明感光树脂[38]	1.18
	QuickWater[33]	1.02
	石蜡[32]	0.93
	聚乙烯醇(PVAL gel)[39]	1.19
	水[40]	1.00
	尼龙[32]	1.11
	Flex聚合物[32]	1.14
胞休奶	TangoBlackPlus[33]	1.11
w 件组约	VeroClear[33]	1.18
	VeroWhitePlus,TangoPlus 掺杂铜和水的聚乳酸[41]	N/A
	聚乙烯醇[42]	N/A
	感光聚合物Formlabs Grey resin[32]	1.175
肿瘤组织	聚对苯二甲酸乙二醇酯[42]	N/A

DOI: https://doi.org/10.17816/DD623341

大学放射学系的一组专家开发了一种乳腺模型,该模型由两大部分组成:一个58毫米厚的丙烯酸半圆柱形容器(模拟压缩的乳腺)和等体积的六种不同直径的丙烯酸球体[49]。另外,球体之间的空间也可以填充水,这种材料的X射线特性与真实的乳腺组织非常相似。评估是在具有断层合成功能的乳房造影系统上进行的。虽然使用这些模型获得的图像模式与实际的乳腺图像并不相似,但这些模型的制作非常简单,可以轻松获取底层组织的不同变化。这个物理模型的顶部有气泡,因为将模型完全充满水会带来一些困难。可以使用计算模型来优化模型填充选项来改进给定的模型[50-52]。

K. Bliznakova等人[53-55]也介绍了类似的方法,即在用感光树脂或尼龙印制的半圆柱形容器中填充感光树脂球体,并使用石蜡或动物油脂作为填充物。这种方法的一种实现形式是小型乳腺人体模型,它的形状是一个半圆柱体,由Form-labs White resin感光聚合物制成。在这个物理模型中放置了27个半径从 6毫米到13毫米不等的Formlabs Grey resin光聚合物球,然后加入动物脂肪。该模型已被用于研究 乳腺的相位对比成像[54],以及开发用于断层合成系统质量控制的合成观察者模型[56]。

用单独打印的元件组装乳腺模型

这种方法需要乳腺主要组织的数字模型:皮 肤、腺体、脂肪组织以及各种肿瘤和微钙化物。 这些独立的数字模型是根据特殊计算机程序中的 数学计算[15,57]或患者医学影像的分割[24]建 立。每个建模的乳腺组织都保存在一个单独的 文件中,并进一步准备用于3D打印。N.T.Dukov 等人开发的人体模型就是采用这种方法的一个例 子,该模型使用立体光刻技术打印外部形状、 乳腺管网和肿瘤,使用ABS塑料长丝逐层沉积成 型(FDM)打印脂肪区[37,53]。使用这些打印材 料的决定是基于广泛的实验研究[32,34]。人体 模型中充满了水,作者使用磨成细粉的蛋壳来模 拟微钙化物。请注意,乳腺本身并不可视化。需 要进一步研究能够模拟所有类型乳腺组织X射线 特性的3D打印新材料。

2016年,创建了带有球形插入物的新版模型[6]。使用Formlabs Clear Resin材料在立体 光刻3D打印机上打印了从乳腺切除术标本计算机 断层扫描图像[22]中获得的人工分割脂肪乳腺切 片模型。然后将它们放入一个装满水的48毫米厚 的半圆柱形容器中,接着在Siemens Mammomat设 备(SiemensHealthineers,德国)上进行乳房 造影成像。结果,实验图像优于原始模型,但与 患者的乳房造影图像相差太大。

对分室模型的进一步改进旨在提高与患者 数据的相似度。这可以通过使用密度较低的印 刷品来提高隔间的对比度,通过减小隔间的比 例来使用较小的隔间,以及改进隔间的分割方 法来实现。最近,维也纳大学的一个团队开发 了球形模型的另一种变体,其中的模型包括由 VeroClear材料制成的球体,并使用石蜡油作为 填充物[58]。

打印一体式乳腺模型 使用单一材料进行印刷

UPenn物理模型[59]是基于上一节[16-18]中 描述的宾夕法尼亚大学的乳腺数学模型。这种制 造技术包括将数字模型的体素初步分割为两部 分:纤维腺组织和脂肪组织。前者使用PolyJet Eden500V打印机(Stratasys,美国),使用腺 组织含量为50%的组织等效材料(FC-720光聚合 物)制造。打印分层进行,以保留空隙,然后用 等效的脂肪组织填充。切片打印的体素分辨率为 60微米。然后将平板融合在一起,形成最终的仿 真模型。对这一物理模型的乳房造影和断层扫描 图像进行的初步实验评估表明,它具有用于二维 和三维X射线乳腺成像系统的定性和定量性能评 估的潜力。利用该模型获得的乳房造影图像在视 觉上与临床图像相似。这种技术的一些局限性与 结构边界不清晰、存在残留气泡(在射线照片上 可见)、制造时间长和生产成本高有关。

J.G.Mainprize等人[40,60]采用类似的方法 创建了一个双组分全尺寸乳腺物理模型。基于体 素的数字模型[61]分为四个板块,以适应不同高 度的插入物。每个板块都切除了一个纤维腺体部 分,只留下脂肪部分。由此产生的脂肪层是用聚 酰胺-12制成的100微米选择性激光烧结打印机打 印出来的。对该模型的研究表明,其与临床全功 能数字乳房造影上获得的过量熵参数数据高度相 似。

N.D. Prionas等人[62]以特定女性患者的乳腺 计算机断层扫描图像为基础,提出了双腔仿真乳 腺模型。腺体部分由水构成,脂肪部分由聚乙烯 构成。首先在专用乳腺计算机断层扫描上获取三 维图像,然后进行噪声消除和脂肪和腺体组织分 割。制造过程与上述过程不同,因为模型是在带 有数控系统的水刀机上制造的。使用水刀从1.59 毫米厚的超高分子量聚乙烯薄片上制造出一叠乳 腺片段,工具路径的中心线沿着组织结构的边缘 确定。在乳腺模体周围用热塑性塑料模制了一个 外容器,其厚度与皮肤厚度相近。容器中装入一 叠乳腺片段,并注满水,使代表腺组织区的模型 中的空气空间充满水。

该模型的大块腺体组织切面与患者原始图像完 全一致。该模型的优势在于其模块化设计,可以 在腺体组织的任何部分插入其他物体。主要的局 限性与所使用的技术和材料有关:聚乙烯块的厚 度以及制造的乳腺区段之间的间隙导致模型比患 者的原始乳腺长2.6厘米。材料特性限制了该模 型在不对乳腺进行压缩的X 射线技术中的应用。 其他一些小问题与腺体组织中的气泡有关,这些 气泡可以在模型组装过程中通过更复杂的脱气技 术去除。另一个小问题来自水研磨切割过程,这 也可能导致外部脂肪轮廓变小,腺体组织轮廓变 宽。 患者的二维乳房造影图像是两个研究小组[63, 64]于2018年和2019年提出并实施的乳腺物理仿真 模型打印方法的关键信息来源。A. Bada等人[63] 基于二维乳房造影图像开发了一种易于复制的技 术来制作拟人乳腺模型。使用0bjet260 Connex3 喷墨打印机(Stratasys,美国)和VeroMagenta 和 VeroCyan打印材料制造乳腺物体。在一项广泛 的实验研究中,使用了三种不同技术的打印机: 立体光刻、FDM造型和喷墨打印[65],这充分证 明了选择这种打印技术的正确性。

这种方法的关键要素是Python编程语言中的 mammoreplicator脚本,它可根据每个图像像素 的灰度以及 乳腺组织和3D打印材料对X射线吸收 的差异计算打印材料的厚度。图像的每个像素都 由脚本转换为相应高度的列。

该模型在10小时内打印完成,质量为750克。 目前,该模型已通过验证,能够正确再现乳房造 影中乳腺的放射学特性。对原始模型和模型乳房 造影的相似性研究表明,解剖学特征的再现准确 度很高。主要的局限性与获得的模型的分辨率有 关。虽然患者乳房造影的初始分辨率为100微米, 但3D打印机无法准确再现小于300微米的临床乳房 造影细节。作者建议使用该技术创建具有代表性 的患者模型集,用于评估乳腺解剖变异性对诊断 系统可靠性的影响。

在S. Schopphoven等人的研究中[64],使用了 压缩至32毫米的乳腺乳房造影成像。关键任务是 为不同的印刷材料(聚丙烯)厚度确定原始图像 的像素强度,以实现临床图像范围的多样性。这 是通过在乳房造影机器上扫描不同厚度(最厚40 毫米)的印刷板来实现的。通过打印材料的高度 差来模拟临床图像像素位置上的相应衰减,从而 在模型上形成类似浮雕的结构。

模型的打印时间约为11小时,消耗了791克 RGD450材料和31克辅助材料。所描述的方法可 以创建仿真的乳房造影模型,逼真地模拟乳腺 的解剖结构和密度特征,可用于各种质量控制 和系统优化任务,也可用于教育和科研目的。 目前存在的主要限制是与原始临床图像相比, 在描绘小细 节时分辨率略有降低。这是由于选 用的打印机和材料组合(PolyJet打印机与聚 丙烯打印材料组合)将输出结构的尺寸限制在 约200微米。这些结构被放置在模型的顶部,因 此比患者乳腺中的结构高出探测器。由于几何 形放大作用,这可能会导致密度较高的乳腺图 像变得锐利。

该模型中微钙酸盐积聚的建模是使用直径为 4毫米的3D打印底板、可移动插入物和碎蛋壳进 行的[38]。底板和插入物是使用0bjet30 Pro PolyJet 3D打印机和VeroClear RGD810材料(美 国Stratasys公司)打印的。底板包括三个直径 为60毫米的圆形空腔,分别放置了编号为"1" 至"3"的环。第一个环,即"病变环",包含 三个直径为10毫米的圆形空腔,并配有相应的盖 子,其中放置了建模的微钙化物。另外两个环是 实体模型,不包含任何结构。所有三个环的大小 相同,这确保了它们之间的互换性,并可改变病 灶相对于拟人模型的位置。使用不同数量和大小 的蛋壳来模拟不同的微钙化物群。

这种方法的优势在于模块化设计,它允许根 据使用目的简单和低成本地集成具有不同损坏的 附加板和环。使用这种技术制作的模型是为二维 磁共振成像应用而设计的。对于三维乳腺成像而 言,物理模型必须能够模拟不同乳腺组织在三维 空间的分布。这可以通过下面讨论的方法之一来 实现。

2018年, N. Okkalidis等人[66]提出了一种 新技术,即通过改变均质模板的填充密度,利 用 FDM建模技术直接从患者计算机断层扫描数据 同步打印乳腺模型。该模板用于精确模拟建模三 维物体的内部结构。物体中最厚的部分是以100% 的最大填充密度制作的,而较柔软轻便的织物则 以较低的密度印刷。这样就能以逼真的放射学精 确度创建不同类型的组织。该方法的基础是读取 每个体素的Hounsfield单位值,并据此调整聚乳 酸丝的挤出速度,以获得所需的挤出丝量。该方 法被直接用于根据患者的计算机断层扫描数据打 印仿真乳腺模型[67]。在传统计算机断层扫描扫 描仪上对该模型进行的首次评估显示,患者的原 始计算机断层扫描切片与模型之间具有视觉相似 性,这促使研究小组开发出一种用于计算机断层 扫描研究的专用模型,特别是未来用于精确计算 机断层扫描剂量测定的实验装置。主要的局限性 在于打印时间较长(数天),以及研究中使用的 FDM建模技术导致打印图案的可见度较低。

使用两种或两种以上材料进行印刷

为了创建理想的仿真乳腺模型,最好使用不同的打印材料。2015年,N.Kiarashi等人[68]朝着 实现这一目标迈出了一大步,他们通过并行使用 两种材料[26,69]进行3D打印,成功制作出了仿 真的压缩乳腺模型。他们使用0bjet500 Connex 三维打印机打印了两个仿真的乳腺模型。第一个 模型名为Doublet,使用两种材料同时打印,分 别模拟腺体和脂肪组织。TangoGray和VeroWhite 材料用于打印纤维腺体部分。研究了黄油和猪油 以1:1的比例混合、蜂蜡、树脂和橄榄油作为填 充材料,以接近脂肪组织的X射线密度。使用不 同的填充技术多次重复了树脂方法,但总是会产 生一些不必要的气泡。

在二维和三维图像中,物理模型具有逼真的 乳腺解剖放射学外观。物理模型的乳房造影描述 与真实的人体乳房造影相符[70,71]。模型的缺 点是由于缺乏合适的打印材料,动态范围和对比 度有限。随着新材料的出现,这一问题将得到解 决。尽管在对比度方面存在限制,但Doublet模 体的主要优点是一体化设计,只需采用一种方法 就能制作出一个模体(整体或部分)。

A. H. Rossman等人的研究[72]进一步发展了 上述方法,打印出仿真乳腺模型,模拟患者的

解剖结构,以评估临床乳房造影和乳腺数字 断层合成的有效性。他们创建了一个具有拟人 区域的模块化模型,以改善病灶和钙化物的检 测,并创建了一个同质区域来评估标准质量控 制指标。VeroPureWhite材料和掺有钨的特殊Jf Flexible树脂用于打印纤维腺组织,而TangoPlus 材料和不含掺杂成分的第三方Jf Flexible树脂则 用于成像低密度脂肪组织。在结构中可以添加地 层、碘化夹杂物和钙化物。该模型目前的局限之 一是无法实现低于36%的乳腺BI-RADS放射密度。 放射密度决定图像的灵敏度:密度越高,乳房 造影的灵敏度越低。目前正在努力实现更低的密 度。

2019年,来自拿坡里的一个研究小组[73]首 次使用FDM3D打印机制造了未压缩和压缩乳腺的 物理模型,模拟了真实乳腺组织的形状、解剖 学和放射学特性。基于乳腺计算机断层扫描数 据的数字模型和三种不同的打印材料被用来制 作仿真乳腺实体模型。聚醋酸乙烯用于打印皮 肤,ABS塑料和尼龙分别用于打印脂肪组织和腺 体组织。皮肤是单独打印的,因为乳腺计算模型 由三种材料制成, 而现有的Ultimaker3 FDM打印 机 (Ultimaker, 荷兰) 最多只能用两种材料打 印物体。模型采用100%密度填充,以最大限度地 减少气隙。内部乳腺区域既可以打印成10毫米厚 的切片,也可以打印成单块双组分材料。此外, 作者还在打印切片中开发了一个区域,用于放置 剂量测定用的TLD芯片,以及用于放置打印病灶 的特殊孔[73,74]。

纸质乳腺拟人模型

使用办公打印纸和传统喷墨式打印机制作乳腺 人体模型是一种经济实惠的方法[75]。一些不透 射线物质,如碘化钾、氧化钛、不透射线物质可 用作油墨助剂。还对羊皮纸进行了研究,发现其 X射线密度与脂肪组织相似。根据C.G.Graff等人 [21]提出的数字模型,使用含有33%或25%碘海醇 体积的羊皮纸和X射线对比油墨的喷墨切片,制 作了一个物理模型。这种制作仿真模型的方法的 优点是成本低,因为在制作过程中使用了市售的 喷墨式打印机、廉价的油墨助剂和一些廉价的附 加材料。本研究使用的喷墨打印机是市售的桌面 喷墨式打印机Epson Workforce 630 (Epson, 日 本)。用的是可重复使用的墨盒,而不是原厂墨 盒。由于打印机有多个彩色墨盒,因此可以打印 不同颜色的其他"织物"。例如,要打印皮肤, 可以确定适当浓度的碘油墨,并将其放入单独的 墨盒中。然后可以在皮肤和腺体图像组织上涂抹 不同的颜色,并进行相应的打印。

总之,3D打印技术是一种经过充分研究的技术,可用于制造X射线成像中使用的仿真乳腺模型[68,72]。3D打印的主要优势在于它允许设计和打印复杂的结构。然而,3D打印工艺的某些特点限制了其多功能性和可行性[41,76,77]。 虽然3D打印可以用各种塑料和硅树脂制造产品, 但并非所有塑料和硅树脂都适合3D打印所需的温度条件。此外,3D打印机的打印室较小,这限制 了产品的尺寸。从实用角度来看,3D打印是一个 昂贵而缓慢的过程,因此不适合大批量生产。速 度慢的原因在于,使用3D打印技术制作拟人化模 型所需的时间取决于设计的复杂程度(模型结构 中需要包含的有机组织和元素的数量,以及所需 的尺寸)。此外,还经常需要对3D打印体模进行 后续处理,以去除结构中的辅助材料,并对表面 进行光顺处理,以实现所需的精加工。这可能包 括水研磨处理、暴露于化学化合物和气热干燥。 这些方法中的每一种都有可能损坏模型或将不 需要的颗粒带入模型中,从而影响X射线成像结 果。

创建物理模型的另一种方法是逐层创建模型。 每一层代表一个平面截面。在这种方法中,模型 创建的复杂性被降低到二维层的处理。这种方法 由C. Theodorakou等人首次提出[78]。在上述研 究中,每个人体模型层由基底和使用标准喷墨打 印机喷涂在基底上的对比材料(染料)组成。此 后,一些研究小组发展了这一概念,并报告了成 功的实施案例[79,80]。逐层制作模型的过程虽 然可以通过在二维层上添加染料来详细形成X射 线密度特性,但也有一些固有的局限性。这些限 制主要是由于对使用对比材料(染料)的依赖。 除了难以优化染料的化学成分外,对比材料通常 处于液态,而基底处于固态。将液态对比材料涂 抹在固态基底上,往往会导致染料渗入基底或在 基底上扩散,从而难以控制对比材料的定位。此 外,这种方法通常需要在单个基底上涂抹多层染 料,从而导致多个干燥步骤,对生产时间造成负 面影响。最后,喷墨打印机组件通常无法承受多 次染料喷涂。喷墨打印机使用小喷嘴输送墨水。 一些造影剂材料,如X射线成像中常用的碘基化 合物,经常会导致喷嘴堵塞,这需要花费大量 的时间和人力进行维护,以消除制造过程中的故 障。

商用人体模型简要概述

由Erler Zimmer开发、GTSimulators公司销售 的乳腺X射线和断层扫描乳腺模型

这种商用模型的制作过程分为两个阶段。首 先,根据C.G.Graff[21]的方法创建乳腺的计算 模型。乳腺表面是通过创建一个正半球形的外壳 形成的,外壳上叠加了一层皮肤和一个乳头。外 壳的形状由两个参数决定:决定乳腺总体积的参 数和校正表面曲率的参数。利用Voronoi分割法, 将外壳内部随机分为脂肪和腺体两部分,每个腺 体部分都包含一个带有末端小叶单元的导管网 络。然后,用额外的乳腺元素(如Cooper韧带、 胸肌和血管)填充体积。此外,还模拟了恶性肿 瘤[81],并随后将其引入模型。

为了对乳腺进行压缩,其体积被转换成一个 四维矩阵,该矩阵的每个元素都被赋予了弹性 属性,这些属性由位于元素中心的腺体或脂肪 组织体素定义。然后使用线性弹性有限元建模 生成矩阵,并将乳腺沿头颈方向压缩至30毫米 厚度。不过,创建具有任何乳腺厚度的模型并 不受限制。由于体模模型基于解析表达式,体 素的压缩厚度和尺寸是任意的;在本研究中, 乳腺模型离散化的各向同性体素大小为70µm, 相当于羊皮纸的厚度。根据探测器元件的尺 寸,在给定的体素尺寸下可能会出现与图像离 散化相关的不良影响。

第二阶段是通过喷墨打印制作实物模型。 打印机是一台市售的桌面喷墨打印机(Epson Workforce 630)。打印分辨率设置为363dpi, 以确保点的大小为70微米,并与数字模型的体 素大小(70微米)相匹配。在此过程中,专用 油墨被涂抹在作为背景脂肪组织的纸张上,以 形成类似腺体组织的密度特征。将传统颜料墨 水 (InkThrift, Vermont PhotoInkjet, East Topsham Village, VT) 与350毫克/毫升的碘海 醇(Omnipaque, GE Healthcare,美国)混合 合成墨水。其中一种溶液含有67%的墨水和33%的 碘海醇,另一种溶液含有75%的墨水和25%的碘海 醇。为了对齐板材,制作了一个专门的打孔器, 在靶标上打孔,然后将薄片放在连接到专门支撑 板的架子上滑动,以确保薄片放置后保持静止。 印刷好的纸张堆放在底板上后,一个带有柱孔的 大型专用压缩桨被放置在纸堆顶部,以固定纸张 并确保均匀压缩。

为了展示模型的功能,在制作完整堆切片后, 在模型中加入了尺寸约为5毫米的三维病灶和含 有微钙化物的簇。首先虚拟引入三维病灶,然后 重新打印选定的病灶延伸切片,并在适当位置将 其替换为无病灶的切片,从而将其放入物理模型 中。微钙钛矿是通过压碎蛋壳并将其放置在物理 模型乳腺上不同腺体密度的位置来建模的。每个 簇的元素数量从11个到大于30个不等。簇的直径 从3.5毫米到8毫米不等。

所使用的材料在X射线密度方面与脂肪组织 和腺体组织相似,制造过程精确、可重复,可 用于乳腺的二维和三维可视化。此外,这种模 型并不局限于单一的乳腺模型,任何虚拟模型 一旦体素化后,都可以用这种独特的方法打印 出来。

该模型经过了验证过程[75],并被用于卷积神 经网络在传统和双能量全格式数字乳房造影中良 性和恶性钙化物鉴别诊断潜力的研究[84]。

BR3D Breast Imaging Phantom

该模型在上文"使用模塑技术制作的乳腺模型"中有所描述,如图3所示。

该模型已在多项研究中得到验证和使用:

基于迭代重建模型的乳腺数字断层合成图像优化研究[83]。使用总变异正则化器实现的乳腺数字断层合成图像的新图像重建算法在BR3乳腺成像模体MODEL 020上进行了验证。结果证实该算法能够准确成像微钙化物和乳腺肿块。





图3. BR3D Breast Imaging Phantom[82].

- 评估GPU对基于模型的乳腺数字断层合成迭代法的加速[84]。研究表明,在三块不同的图形处理器板上实施并行处理可快速实现乳腺数字断层合成图像的迭代重建。
- 评估生成对抗网络在乳腺数字断层合成中提高图像质量和减少辐射剂量的作用[85]。使用条件生成对抗网络[cGAN(pix2pix)]进行重建预处理后,乳腺数字断层合成术在低剂量条件下的图像质量得到了改善。

其他乳腺人体模型

市场上有一些商用乳腺模拟,但没有研究使用 数据。这些模型包括以下型号:

 CIRS 011A型是一个组织等效拟人模型,用 于测试各类乳房造影系统的性能。模型中嵌 入了钙化组织、导管和肿瘤模型作为测试对 象。测试对象的大小各不相同,因此可以在 不同的复杂程度上对系统进行检查。树脂材 料模拟不同乳腺组织的光子衰减系数。模拟



图4。制造商CIRS生产的011A型。

组织的平均元素组成基于脂肪和腺体组织的 单个元素组成。该模型已用于多项旨在提高 诊断方法准确性的研究[86-88]。该模型如 图4所示。

- True Phantom Solutions公司(加拿大)生 产的BT-A01是根据典型的解剖学特征精心制 作符合真人大小的女性半躯干的图像。它可 用于乳房造影、CT和磁共振成像。目标受众 是医务工作者和学生。
- Complex Breast PhantomSynAtomy 160650 由SynDaver (美国)制造,是一个仿真乳腺 模型,专为培训学生和医务人员而设计。模 式:超声波、弹性成像、乳房造影。

结论

本文简要概述了用于X射线成像的仿真乳腺 模型的开发和应用历史。制作此类模型的不同 方法既有优点也有局限性。根据具体的医学成 像任务,可能会选择其中一种或另一种方法。 计算拟人模型具有解剖保真度,建模相对容 易,而物理拟人模型则难以制作。现有技术成 本高,劳动强度大,使用的材料范围有限。尽 管在这一领域已做了大量工作,但仍需要找到 具有适合不同类型乳腺组织的X射线吸收系数的 新材料。此外,还需要开发和实施低成本制造 技术。这将改进并加快用于X射线成像的仿真乳 腺模型的制造。

ADDITIONAL INFORMATION

Funding source. This article was prepared by a group of authors as a part of the research and development effort titled "Scientific rationale for development and use of tissue-equivalent materials to design test objects for radiology" (USIS No.: № 123092000013-3) in accordance with the Order No. 1196 dated December 21, 2022 "On approval of state assignments funded by means of allocations from the budget of the city of Moscow to the state budgetary (autonomous) institutions subordinate to the Moscow Health Care Department, for 2023 and the planned period of 2024 and 2025" issued by the Moscow Health Care Department.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work. Yuriy A. Vasilev — conception and design of the study, data analysis, approval of the final version of the article; Olga V. Omelyanskaya — conception and design of the study, editing, approval of the final version of the article; Anastasia A. Nasibullina — text writing, data collection and processing, data analysis; Denis V. Leonov — data collection and processing, data analysis, editing; Julia V. Bulgakova — text writing, data collection and processing, literature review; Yuliya F. Shumskaya — text writing, data collection and processing, literature review; Roman V. Reshetnikov — conception and design of the study, literature review, editing, approval of the final version of the study, literature review; weiting, approval of the final version of the study.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Leonov D., Venidiktova D., Costa-Júnior J.F.S., et al. Development of an anatomical breast phantom from polyvinyl chloride plastisol with lesions of various shape, elasticity and

echogenicity for teaching ultrasound examination // International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery. 2023. doi: 10.1007/s11548-023-02911-4

REVIEWS

2. Nuzov N.B., Bhusal B., Henry K.R., et al. True location of deep brain stimulation electrodes differs from what is seen on postoperative magnetic resonance images: An anthropomorphic phantom study // Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 2022. P. 1863–1866. doi: 10.1109/EMBC48229.2022.9871619

3. Cannella R., Shahait M., Furlan A.A., et al. Efficacy of singlesource rapid kV-switching dual-energy CT for characterization of non-uric acid renal stones: a prospective ex vivo study using anthropomorphic phantom // Abdominal Radiology. 2020. Vol. 45, N 4. P. 1092–1099. doi: 10.1007/s00261-019-02164-3

4. Kramer R., Zankl M., Williams G., Drexler G., et al. The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods. 1982.

5. Васильев Ю.А., Тыров И.А., Владзимирский А.В., и др. Двойной просмотр результатов маммографии с применением технологий искусственного интеллекта: новая модель организации массовых профилактических исследований // Digital Diagnostics. 2023. Т. 4, № 2. С. 93–104. doi: 10.17816/DD3214236.

6. Cockmartin L., Bosmans H., Marshall N.W. Comparative power law analysis of structured breast phantom and patient images in digital mammography and breast tomosynthesis // Med Phys. 2013. Vol. 40, N $^{\circ}$ 8. P. 81920.

7. Ma A.K.W., Gunn S., Darambara D.G. Introducing DeBRa: a detailed breast model for radiological studies // Physics in medicine and biology. 2009. Vol. 54, N 14. P. 4533–4545. doi: 10.1088/0031-9155/54/14/010

 Chen B., Shorey J., Saunders R.S., et al. An Anthropomorphic Breast Model for Breast Imaging Simulation and Optimization // Academic radiology. 2011. Vol. 18, N 5. P. 536–546. doi: 10.1016/j.acra.2010.11.009
 Elangovan P., Mackenzie A., Dance D.R., et al. Design and validation of realistic breast models for use in multiple alternative forced choice virtual clinical trials // Physics in medicine and biology. 2017. Vol. 62, N 7. P. 2778–2794. doi: 10.1088/1361-6560/aa622c

 Bliznakova K., Suryanarayanan S., Karellas A., Pallikarakis N. Evaluation of an improved algorithm for producing realistic 3D breast software phantoms: Application for mammography // Medical Physics. 2010. Vol. 37, N 11. P. 5604–5617. doi: 10.1118/1.3491812
 O'Connor J.M., Das M., Dider C., Mahd M., Glick S.J. Generation of voxelized breast phantoms from surgical mastectomy specimens // Medical Physics. 2013. Vol. 40, N 4. doi: 10.1118/1.4795758
 Lau B.A., Reiser I., Nishikawa R.M. A statistically defined anthropomorphic software breast phantom // Medical Physics. 2012. Vol. 39, N 6. P. 3375–3385. doi: 10.1118/1.4718576

13. Sarno A., Mettivier G., di Franco F., et al. Dataset of patientderived digital breast phantoms for in silico studies in breast computed tomography, digital breast tomosynthesis, and digital mammography // Medical Physics. 2021. Vol. 48, N 5. P. 2682–2693. doi: 10.1002/mp.14826

14. Li C.M., Segars W.P., Tourassi G.D., Boone J.M., Dobbins J.T. Methodology for generating a 3D computerized breast phantom from empirical data // Medical Physics. 2009. Vol. 36, N 7. P. 3122–3131. doi: 10.1118/1.3140588

15. Bliznakova K., Bliznakov Z., Bravou V., Kolitsi Z., Pallikarakis N. A three-dimensional breast software phantom for mammography simulation // Physics in medicine and biology. 2003. Vol. 48, N 22. P. 3699–3719. doi: 10.1088/0031-9155/48/22/006

16. Bakic P.R., Albert M., Brzakovic D., Maidment A.D. Mammogram synthesis using a 3D simulation. I. Breast tissue model and image

acquisition simulation // Medical Physics. 2002. Vol. 29, N 9. P. 2131–2139. doi: 10.1118/1.1501143

17. Bakic P.R., Albert M., Brzakovic D., Maidment A.D. Mammogram synthesis using a 3D simulation. II. Evaluation of synthetic mammogram texture // Medical Physics. 2002. Vol. 29, N 9. P. 2140–2151. doi: 10.1118/1.1501144

18. Bakic P.R., Albert M., Brzakovic D., Maidment A.D. Mammogram synthesis using a three-dimensional simulation. III. Modeling and evaluation of the breast ductal network // Medical Physics. 2003. Vol. 30, N 7. P. 1914–1925. doi: 10.1118/1.1586453

19. Pokrajac D.D., Maidment A.D.A., Bakic P.R. Optimized generation of high resolution breast anthropomorphic software phantoms // Medical Physics. 2012. Vol. 39, N 4. P. 2290–2302. doi: 10.1118/1.3697523

20. Chen F., Pokrajac D., Shi X., et al. Partial volume simulation in software breast phantoms // Medical Imaging 2012: Physics of Medical Imaging. 2012. doi: 10.1117/12.912242

21. Graff C.G. A new, open-source, multi-modality digital breast phantom // Proceedings of the SPIE. 2016. Vol. 9783. doi: 10.1117/12.2216312

22. Ikejimba L.C., Salad J., Graff C.G., et al. A four-alternative forced choice (4AFC) methodology for evaluating microcalcification detection in clinical full-field digital mammography (FFDM) and digital breast tomosynthesis (DBT) systems using an inkjet-printed anthropomorphic phantom // Medical Physics. 2019. Vol. 46, N 9. P. 3883–3892. doi: 10.1002/mp.13629

23. Imran A.-A.-Z., Bakic P.R., Pokrajac D.D. Spatial distribution of adipose compartments size, shape and orientation in a CT breast image of a mastectomy specimen // 2015 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB). 2015. P. 1–2. doi: 10.1109/SPMB.2015.7405460

24. Imran A.-A.-Z., Pokrajac D.D., Maidment A.D.A., Bakic P.R. Estimation of adipose compartment volumes in CT images of a mastectomy specimen // Proceedings of the SPIE. 2016. Vol. 9783. doi: 10.1117/12.2217175

25. Hoeschen C., Fill U., Zankl M., et al. A high-resolution voxel phantom of the breast for dose calculations in mammography // Radiation protection dosimetry. 2005. Vol. 114, N 1–3. P. 406–409. doi: 10.1093/rpd/nch558

26. Hsu C.M., Palmeri M.L., Segars W.P., Veress A.I., Dobbins J.T. An analysis of the mechanical parameters used for finite element compression of a high-resolution 3D breast phantom // Medical Physics. 2011. Vol. 38, N 10. P. 5756–5770. doi: 10.1118/1.3637500

27. Hsu C.M.L., Palmeri M.L., Segars W.P., Veress A.I., Dobbins J.T. Generation of a suite of 3D computer-generated breast phantoms from a limited set of human subject data // Medical Physics. 2013. Vol. 40, N 4. doi: 10.1118/1.4794924

28. Huang S.Y., Boone J.M., Yang K., et al. The characterization of breast anatomical metrics using dedicated breast CT // Medical Physics. 2011. Vol. 38, N 4. P. 2180–2191. doi: 10.1118/1.3567147

29. Segars W.P., Veress A.I., Wells J.R., et al. Population of 100 realistic, patient-based computerized breast phantoms for multi-modality imaging research // Proceedings of the SPIE. 2014. Vol. 9033. doi: 10.1117/12.2043868

30. Erickson D.W., Wells J.R., Sturgeon G.M., et al. Population of 224 realistic human subject-based computational breast phantoms // Medical Physics. 2015. Vol. 43, N 1. P. 23–32. doi: 10.1118/1.4937597

31. Sarno A., Mettivier G., Di Lillo F., et al. Homogeneous vs. patient specific breast models for Monte Carlo evaluation of mean glandular dose in mammography // Physica Medica. 2018. Vol. 51. P. 56–63. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.04.392

32. Ivanov D., Bliznakova K., Buliev I., et al. Suitability of low density materials for 3D printing of physical breast phantoms // Physics in medicine and biology. 2018. Vol. 63, N 17. doi: 10.1088/1361-6560/aad315

33. Santos J.C., Almeida C.D., Iwahara A., Peixoto J.E. Characterization and applicability of low-density materials for making 3D physical anthropomorphic breast phantoms // Radiation Physics and Chemistry. 2019. Vol. 164. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108361

34. Esposito G., Mettivier G., Bliznakova K., et al. Investigation of the refractive index decrement of 3D printing materials for manufacturing breast phantoms for phase contrast imaging // Physics in medicine and biology. 2019. Vol. 64, N 7. doi: 10.1088/1361-6560/ab0670

35. Bliznakova K., Buliev I., Bliznakov Z. Anthropomorphic Phantoms in Image Quality and Patient Dose Optimization. Philadelphia : IOP Publishing, 2018. doi: 10.1088/2053-2563/aae197

36. Hernandez A.M., Seibert J.A., Nosratieh A., Boone J.M. Generation and analysis of clinically relevant breast imaging x-ray spectra // Medical Physics. 2017. Vol. 44, N 6. P. 2148–2160. doi: 10.1002/mp.12222

37. Dukov N.T., Feradov F.N., Gospodinova G.D., Bliznakova K.S. An Approach for Printing Tissue-mimicking Abnormalities Dedicated to Applications in Breast Imaging // 2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET). 2019. P. 1–4. doi: 10.1109/ET.2019.8878587

38. Mäder U., Martin F., Karin B., Stephan S. Concept to extend anthropomorphic breast phantoms for 2D digital mammography with movable lesions at variable reproducible positions // 15th International Workshop on Breast Imaging (IWBI2020). 2020. doi: 10.1117/12.2560619

39. Okoh F.O., Kabir N.A., Mohd F.M.Y., Siti N.A.A. Measurement of mass attenuation coefficient of polyvinyl alcohol (PVAL) as breast tissue equivalent material in the photon energy range of 16.61–25.26 keV // Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1535, N 1. doi: 10.1088/1742-6596/1535/1/012051

40. Mainprize J.G., Mawdsley G.E., Carton A.-K., et al. Fullsize anthropomorphic phantom for 2D and 3D breast x-ray imaging // Proceedings of the SPIE. 2020. Vol. 11513. P. 17. doi: 10.1117/12.2560358

41. Filippou V., Tsoumpas C. Recent advances on the development of phantoms using 3D printing for imaging with CT, MRI, PET, SPECT, and ultrasound // Medical Physics. 2018. Vol. 45, N 9. P. e740–e760. doi: 10.1002/mp.13058

42. di Franco F., Mettivier G., Sarno A., Varallo A., Russo P. Manufacturing of physical breast phantoms with 3D printing technology for X-ray breast imaging // 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059986

43. Sage J., Fezzani K.L., Fitton I., et al. Experimental evaluation of seven quality control phantoms for digital breast tomosynthesis // Physica Medica. 2019. Vol. 57. P. 137–144. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.12.031

44. Freed M., Badal A., Jennings R.J., et al. X-ray properties of an anthropomorphic breast phantom for MRI and x-ray

imaging // Physics in medicine and biology. 2011. Vol. 56, N 12. P. 3513–3533. doi: 10.1088/0031-9155/56/12/005

45. Ruvio G., Solimene R., Cuccaro A., et al. Multimodal Breast Phantoms for Microwave, Ultrasound, Mammography, Magnetic Resonance and Computed Tomography Imaging // Sensors. 2020. Vol. 20, N 8. P. 2400. doi: 10.3390/s20082400

46. Baldelli P., Phelan N., Egan G. Investigation of the effect of anode/filter materials on the dose and image quality of a digital mammography system based on an amorphous selenium flat panel detector // Br J Radiol. 2010. Vol. 83, N 988. P. 290–295. doi: 10.1259/bjr/60404532

47. Park S., Jennings R., Liu H., Badano A., Myers K. A statistical, task-based evaluation method for three-dimensional x-ray breast imaging systems using variable-background phantoms // Medical Physics. 2010. Vol. 37, N 12. P. 6253–6270. doi: 10.1118/1.3488910 **48.** Taibi A., Fabbri S., Baldelli P., et al. Dual-energy imaging in full-field digital mammography: a phantom study // Physics in medicine and biology. 2003. Vol. 48, N 13. P. 1945–1956. doi: 10.1088/0031-9155/48/13/307

49. Cockmartin L., Marshall N., Bosmans H. Design and Evaluation of a Phantom with Structured Background for Digital Mammography and Breast Tomosynthesis. In: Maidment A.D.A., Bakic P.R., Gavenonis S., editors. Breast Imaging. IWDM 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7361. Berlin : Springer, 2012. doi: 10.1007/978-3-642-31271-7_83

50. Baneva Y., Bliznakova K., Cockmartin L., et al. Evaluation of a breast software model for 2D and 3D X-ray imaging studies of the breast // Physica Medica. 2017. Vol. 41. P. 78–86. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.04.024

51. Bliznakova K. Development of breast software phantom dedicated for research and educational purposes // RAD Association Journal. 2017. Vol. 2, N 1. P. 14–19. doi: 10.21175/RadJ.2017.01.004 **52.** Marinov S., Carton A.-K., Cockmartin L., et al. Evaluation of the visual realism of breast texture phantoms in digital mammography // Proc. SPIE 11513, 15th International Workshop on Breast Imaging (IWBI2020). 2020. doi: 10.1117/12.2564124

53. Feradov F., Marinov S., Bliznakova K. Physical Breast Phantom Dedicated for Mammography Studies. In: Henriques J., Neves N., de Carvalho P., editors. XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing – MEDICON 2019. MEDICON 2019. IFMBE Proceedings, vol 76. Springer, 2020. P. 344–352. doi: 10.1007/978-3-030-31635-8_41

54. Bliznakova K., Mettivier G., Russo P., Bliznakov Zh. Validation of a software platform for 2D and 3D phase contrast imaging: preliminary subjective evaluation // 15th International Workshop on Breast Imaging (IWBI2020). 2020. P. 97. doi: 10.1117/12.2564356

55. Bliznakova K., Mettivier G., Russo P., et al. A software platform for phase contrast x-ray breast imaging research // Comput Biol Med. 2015. Vol. 61. P. 62–74. doi: 10.1016/j.compbiomed.2015.03.017
56. Petrov D., Marshall N.W., Young K.C., Bosmans H. Systematic approach to a channelized Hotelling model observer implementation for a physical phantom containing mass-like lesions: Application to digital breast tomosynthesis // Physica Medica. 2019. Vol. 58. P. 8–20. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.12.033

57. Mettivier G., Bliznakova K., Sechopoulos I., et al. Evaluation of the BreastSimulator Software Platform for Breast Tomography: Preliminary Results // Physics in Medicine and Biology. 2016. Vol. 62, N 16. P. 145–151. doi: 10.1088/1361-6560/aa6ca3

58. Salomon E., Semturs F., Unger E., et al. Equivalent breast thickness and dose sensitivity of a next iteration 3D structured breast phantom with lesion models // Medical Imaging 2020: Physics of Medical Imaging. 2020. doi: 10.1117/12.2548956

59. Carton A.-K., Bakic P., Ullberg C., Derand H., Maidment A.D. Development of a physical 3D anthropomorphic breast phantom // Medical Physics. 2011. Vol. 38, N 2. P. 891–896. doi: 10.1118/1.3533896

60. Mainprize J.G., Carton A.-K., Klausz R., et al. Development of a physical 3D anthropomorphic breast texture model using selective laser sintering rapid prototype printing // Medical Imaging 2018: Physics of Medical Imaging. 2018. P. 9. doi: 10.1117/12.2560358

61. Li Z., Desolneux A., Muller S., Carton A.-K. A Novel 3D Stochastic Solid Breast Texture Model for X-Ray Breast Imaging. In: Tingberg A., Lång K., Timberg P., editors. Breast Imaging. IWDM 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9699. Springer, 2016. P. 660–667. doi: 10.1007/978-3-319-41546-8_822016

62. Prionas N.D., Burkett G.W., McKenney S.E., et al. Development of a patient-specific two-compartment anthropomorphic breast phantom // Physics in medicine and biology. 2012. Vol. 57, N 13. P. 4293–4307. doi: 10.1088/0031-9155/57/13/4293

63. Badal A., Clark M., Ghammraoui B. Reproducing twodimensional mammograms with three-dimensional printed phantoms // Journal of Medical Imaging. 2018. Vol. 5, N 3. doi: 10.1117/1.JMI.5.3.033501

64. Schopphoven S., Cavael P., Bock K., Fiebich M., Mäder U. Breast phantoms for 2D digital mammography with realistic anatomical structures and attenuation characteristics based on clinical images using 3D printing // Physics in medicine and biology. 2019. Vol. 64, N 21. doi: 10.1088/1361-6560/ab3f6a

65. Clark M., Ghammraoui B., Badal A. Reproducing 2D breast mammography images with 3D printed phantoms // Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging. 2016. Vol. 9783. doi: 10.1117/12.2217215

66. Okkalidis N. A novel 3D printing method for accurate anatomy replication in patient-specific phantoms // Medical Physics. 2018. Vol. 45, N 10. P. 4600–4606. doi: 10.1002/mp.13154

67. Daskalov S., Okkalidis N., Boone J.M., et al. Anthropomorphic Physical Breast Phantom Based on Patient Breast CT Data: Preliminary Results. In: Henriques J., Neves N., de Carvalho P., editors. XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing – MEDICON 2019. MEDICON 2019. IFMBE Proceedings, vol 76. Springer, 2020. P. 367–374. doi: 10.1007/978-3-030-31635-8_442020

68. Kiarashi N., Nolte A.C., Sturgeon G.M., et al. Development of realistic physical breast phantoms matched to virtual breast phantoms based on human subject data // Medical Physics. 2015. Vol. 42, N 7. P. 4116–4126. doi: 10.1118/1.4919771

69. Lindfors K.K., Boone J.M., Nelson T.R., et al. Dedicated Breast CT: Initial Clinical Experience // Radiology. 2008. Vol. 246, N 3. P. 725–733. doi: 10.1148/radiol.2463070410

70. Burgess A.E., Judy P.F. Signal detection in power-law noise: effect of spectrum exponents // Journal of the Optical Society of America A. 2007. Vol. 24, N 12. P. B52–B60. doi: 10.1364/JOSAA.24.000B52

71. Burgess A.E., Jacobson F.L., Judy P.F. Human observer detection experiments with mammograms and power-law noise // Medical Physics. 2001. Vol. 28, N 4. P. 419–437. doi: 10.1118/1.1355308

72. Rossman A.H., Catenacci M., Zhao C., et al. Three-dimensionallyprinted anthropomorphic physical phantom for mammography and digital breast tomosynthesis with custom materials, lesions, and uniform quality control region // Journal of Medical Imaging. 2019. Vol. 6, N 2. doi: 10.1117/1.JMI.6.2.021604

73. Mettivier G., Sarno A., Boone J.M., et al. Virtual clinical trials in 3D and 2D breast imaging with digital phantoms derived from clinical breast CT scans // Medical Imaging 2020: Physics of Medical Imaging. 2020. doi: 10.1117/12.2548224

74. Mettivier G., Sarno A, di Franco F., et al. The Napoli-Varna-Davis project for virtual clinical trials in X-ray breast imaging // 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC). 2019. P. 1–5. doi: 10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059828

75. Ikejimba L.C., Graff C.G., Rosenthal S., et al. A novel physical anthropomorphic breast phantom for 2D and 3D x-ray imaging // Medical Physics. 2017. Vol. 44, N 2. P. 407–416. doi: 10.1002/mp.12062

76. Mei K., Geagan M., Roshkovan L., et al. Three-dimensional printing of patient-specific lung phantoms for CT imaging: Emulating lung tissue with accurate attenuation profiles and textures // Medical Physics. 2022. Vol. 49, N 2. P. 825–835. doi: 10.1002/mp.15407

77. Ionita C.N., Mokin M., Varble N., et al. Challenges and limitations of patient-specific vascular phantom fabrication using 3D Polyjet printing // Proceedings of SPIE--the International Society for Optical Engineering. doi: 10.1117/12.2042266

78. Theodorakou C., Horrocks J.A., Marshall N.W., Speller R.D. A novel method for producing x-ray test objects and phantoms // Physics in medicine and biology. 2004. Vol. 49, N 8. P. 1423–1438. doi: 10.1088/0031-9155/49/8/004

79. Sikaria D., Musinsky S., Sturgeon G.M., et al. Second generation anthropomorphic physical phantom for mammography and DBT: Incorporating voxelized 3D printing and inkjet printing of iodinated lesion inserts. Proc. SPIE 9783, Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging. 2016. doi: 10.1117/12.2217667

80. Jahnke P., Limberg F.R., Gerbl A., et al. Radiopaque Three-dimensional Printing: A Method to Create Realistic CT Phantoms // Radiology. 2017. Vol. 282, N 2. P. 569–575. doi: 10.1148/radiol.2016152710

81. de Sisternes L., Brankov J.G., Zysk A.M., et al. A computational model to generate simulated three-dimensional breast masses // Medical Physics. 2015. Vol. 42, N 2. P. 1098–1118. doi: 10.1118/1.4905232

82. SUN NUCLEAR. BR3D BREAST IMAGING PHANTOM [Internet] [дата обращения 01.01.2023]. Доступ по ссылке: https://www.cirsinc.com/products/mammography/br3d-breast-imaging-phantom/

83. Piccolomini E.L., Morotti E. A Model-Based Optimization Framework for Iterative Digital Breast Tomosynthesis Image Reconstruction // Journal of imaging. 2021. Vol. 7, N 2. P. 36. doi: 10.3390/jimaging7020036

84. Cavicchioli R., Hu J.C., Loli Piccolomini E., Morotti E., Zanni L. GPU acceleration of a model-based iterative method for Digital Breast Tomosynthesis // Scientific reports. 2020. Vol. 10, N 1. P. 43. doi: 10.1038/s41598-019-56920-y

85. Gomi T., Kijima Y., Kobayashi T., Koibuchi Y. Evaluation of a Generative Adversarial Network to Improve Image Quality and Reduce Radiation-Dose during Digital Breast Tomosynthesis // Diagnostics. 2022. Vol. 12, N 2. P. 495. doi: 10.3390/diagnostics1202049586.

86. Cockmartin L., Bosmans H., Marshall N.W. Establishing a quality control protocol for dual-energy based contrast-enhanced digital mammography // Proceedings of the SPIE. 2021. Vol. 11595. doi: 10.1117/12.2581816

Digital Diagnostics

87. Marimón E., Marsden P.A., Nait-Charif H., Díaz O. A semi-empirical model for scatter field reduction in digital mammography // Physics in medicine and biology. 2021. Vol. 66, N 4. doi: 10.1088/1361-6560/abd231

REFERENCES

1. Leonov D, Venidiktova D, Costa-Júnior JFS, et al. Development of an anatomical breast phantom from polyvinyl chloride plastisol with lesions of various shape, elasticity and echogenicity for teaching ultrasound examination. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery.* 2023. doi: 10.1007/s11548-023-02911-4

2. Nuzov NB, Bhusal B, Henry KR, et al. True location of deep brain stimulation electrodes differs from what is seen on postoperative magnetic resonance images: An anthropomorphic phantom study. *Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society.* 2022:1863–1866. doi: 10.1109/EMBC48229.2022.9871619

3. Cannella R, Shahait M, Furlan AA, et al. Efficacy of single-source rapid kV-switching dual-energy CT for characterization of non-uric acid renal stones: a prospective ex vivo study using anthropomorphic phantom. *Abdominal Radiology*. 2020;45(4):1092–1099. doi: 10.1007/s00261-019-02164-3

4. Kramer R, Zankl M, Williams G, Drexler G, et al. *The calculation of dose from external photon exposures using reference human phantoms and Monte Carlo methods*. 1982.

5. Vasilev YA, Tyrov IA, Vladzymyrskyy AV, et al. Double-reading mammograms using artificial intelligence technologies: A new model of mass preventive examination organization. *Digital Diagnostics*. 2023;4(2):93–104. doi: 10.17816/DD321423

6. Cockmartin L, Bosmans H, Marshall NW. Comparative power law analysis of structured breast phantom and patient images in digital mammography and breast tomosynthesis. *Medical physics*. 2013;40(8):081920. doi: 10.1118/1.4816309

7. Ma AKW, Gunn S, Darambara DG. Introducing DeBRa: a detailed breast model for radiological studies. *Physics in medicine and biology.* 2009;54(14):4533–4545. doi: 10.1088/0031-9155/54/14/010

8. Chen B, Shorey J, Saunders RS, et al. An Anthropomorphic Breast Model for Breast Imaging Simulation and Optimization. *Academic radiology*. 2011;18(5):536–546. doi: 10.1016/j.acra.2010.11.009

9. Elangovan P, Mackenzie A, Dance DR, et al. Design and validation of realistic breast models for use in multiple alternative forced choice virtual clinical trials. *Physics in medicine and biology.* 2017;62(7):2778–2794. doi: 10.1088/1361-6560/aa622c

10. Bliznakova K, Suryanarayanan S, Karellas A, Pallikarakis N. Evaluation of an improved algorithm for producing realistic 3D breast software phantoms: Application for mammography. *Medical Physics*. 2010;37(11):5604–5617. doi: 10.1118/1.3491812

11. O'Connor JM, Das M, Dider C, Mahd M, Glick SJ. Generation of voxelized breast phantoms from surgical mastectomy specimens. *Medical Physics.* 2013;40(4). doi: 10.1118/1.4795758

12. Lau BA, Reiser I, Nishikawa RM. A statistically defined anthropomorphic software breast phantom. *Medical Physics*. 2012;39(6):3375–3385. doi: 10.1118/1.4718576

13. Sarno A, Mettivier G, di Franco F, et al. Dataset of patient-derived digital breast phantoms for in silico studies in breast computed

88. Silver E.H., Shulman S.D., Rehani M.M. Innovative monochromatic x-ray source for high-quality and low-dose medical imaging // Medical Physics. 2021. Vol. 48, N 3. P. 1064–1078. doi: 10.1002/mp.14677

tomography, digital breast tomosynthesis, and digital mammography. *Medical Physics*. 2021;48(5):2682–2693. doi: 10.1002/mp.14826

14. Li CM, Segars WP, Tourassi GD, Boone JM, Dobbins JT. Methodology for generating a 3D computerized breast phantom from empirical data. *Medical Physics.* 2009;36(7):3122–3131. doi: 10.1118/1.3140588

15. Bliznakova K, Bliznakov Z, Bravou V, Kolitsi Z, Pallikarakis N. A three-dimensional breast software phantom for mammography simulation. *Physics in medicine and biology*. 2003;48(22):3699–3719. doi: 10.1088/0031-9155/48/22/006

16. Bakic PR, Albert M, Brzakovic D, Maidment AD. Mammogram synthesis using a 3D simulation. I. Breast tissue model and image acquisition simulation. *Medical Physics*. 2002;29(9):2131–2139. doi: 10.1118/1.1501143

17. Bakic PR, Albert M, Brzakovic D, Maidment AD. Mammogram synthesis using a 3D simulation. II. Evaluation of synthetic mammogram texture. *Medical Physics*. 2002;29(9):2140–2151. doi: 10.1118/1.1501144

18. Bakic PR, Albert M, Brzakovic D, Maidment AD. Mammogram synthesis using a three-dimensional simulation. III. Modeling and evaluation of the breast ductal network. *Medical Physics*. 2003;30(7):1914–1925. doi: 10.1118/1.1586453

19. Pokrajac DD, Maidment ADA, Bakic PR. Optimized generation of high resolution breast anthropomorphic software phantoms. *Medical Physics.* 2012;39(4):2290–2302. doi: 10.1118/1.3697523

20. Chen F, Pokrajac D, Shi X, et al. Partial volume simulation in software breast phantoms. *Medical Imaging 2012: Physics of Medical Imaging*. 2012. doi: 10.1117/12.912242

21. Graff CG. A new, open-source, multi-modality digital breast phantom. *Proceedings of the SPIE*. 2016;9783. doi: 10.1117/12.2216312 **22.** Ikejimba LC, Salad J, Graff CG, et al. A four-alternative forced choice (4AFC) methodology for evaluating microcalcification detection in clinical full-field digital mammography (FFDM) and digital breast tomosynthesis (DBT) systems using an inkjet-printed anthropomorphic phantom. *Medical Physics*. 2019;46(9):3883–3892. doi: 10.1002/mp.13629

23. Imran A-A-Z, Bakic PR, Pokrajac DD. Spatial distribution of adipose compartments size, shape and orientation in a CT breast image of a mastectomy specimen. *2015 IEEE Signal Processing in Medicine and Biology Symposium (SPMB).* 2015:1–2. doi: 10.1109/SPMB.2015.7405460

24. Imran A-A-Z, Pokrajac DD, Maidment ADA, Bakic PR. Estimation of adipose compartment volumes in CT images of a mastectomy specimen. *Proceedings of the SPIE.* 2016;9783. doi: 10.1117/12.2217175

25. Hoeschen C, Fill U, Zankl M, et al. A high-resolution voxel phantom of the breast for dose calculations in mammography. *Radiation protection dosimetry.* 2005;114(1–3):406–409. doi: 10.1093/rpd/nch558

26. Hsu CM, Palmeri ML, Segars WP, Veress AI, Dobbins JT. An analysis of the mechanical parameters used for finite element

compression of a high-resolution 3D breast phantom. *Medical Physics*. 2011;38(10):5756–5770. doi: 10.1118/1.3637500

27. Hsu CML, Palmeri ML, Segars WP, Veress AI, Dobbins JT. Generation of a suite of 3D computer-generated breast phantoms from a limited set of human subject data. *Medical Physics*. 2013;40(4). doi: 10.1118/1.4794924

28. Huang SY, Boone JM, Yang K, et al. The characterization of breast anatomical metrics using dedicated breast CT. *Medical Physics*. 2011;38(4):2180–2191. doi: 10.1118/1.3567147

29. Segars WP, Veress AI, Wells JR, et al. Population of 100 realistic, patient-based computerized breast phantoms for multi-modality imaging research. *Proceedings of the SPIE.* 2014;9033. doi: 10.1117/12.2043868

30. Erickson DW, Wells JR, Sturgeon GM, et al. Population of 224 realistic human subject-based computational breast phantoms. *Medical Physics*. 2015;43(1):23–32. doi: 10.1118/1.4937597

31. Sarno A, Mettivier G, Di Lillo F, et al. Homogeneous vs. patient specific breast models for Monte Carlo evaluation of mean glandular dose in mammography. *Physica Medica*. 2018;51:56–63. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.04.392

32. Ivanov D, Bliznakova K, Buliev I, et al. Suitability of low density materials for 3D printing of physical breast phantoms. *Physics in medicine and biology*. 2018;63(17). doi: 10.1088/1361-6560/aad315
33. Santos JC, Almeida CD, Iwahara A, Peixoto JE. Characterization and applicability of low-density materials for making 3D physical anthropomorphic breast phantoms. *Radiation Physics and Chemistry*. 2019;164. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.108361

34. Esposito G, Mettivier G, Bliznakova K, et al. Investigation of the refractive index decrement of 3D printing materials for manufacturing breast phantoms for phase contrast imaging. *Physics in medicine and biology*. 2019;64(7). doi: 10.1088/1361-6560/ab0670

35. Bliznakova K, Buliev I, Bliznakov Z. *Anthropomorphic Phantoms in Image Quality and Patient Dose Optimization*. Philadelphia: IOP Publishing; 2018. doi: 10.1088/2053-2563/aae197

36. Hernandez AM, Seibert JA, Nosratieh A, Boone JM. Generation and analysis of clinically relevant breast imaging x-ray spectra. *Medical Physics*. 2017;44(6):2148–2160. doi: 10.1002/mp.12222

37. Dukov NT, Feradov FN, Gospodinova GD, Bliznakova KS. An Approach for Printing Tissue-mimicking Abnormalities Dedicated to Applications in Breast Imaging. *2019 IEEE XXVIII International Scientific Conference Electronics (ET).* 2019:1–4. doi: 10.1109/ET.2019.8878587

38. Mäder U, Martin F, Karin B, Stephan S. Concept to extend anthropomorphic breast phantoms for 2D digital mammography with movable lesions at variable reproducible positions. *15th International Workshop on Breast Imaging (IWBI2020).* 2020. doi: 10.1117/12.2560619

39. Okoh FO, Kabir NA, Mohd FMY, Siti NAA. Measurement of mass attenuation coefficient of polyvinyl alcohol (PVAL) as breast tissue equivalent material in the photon energy range of 16.61–25.26 keV. *Journal of Physics: Conference Series.* 2020;1535(1). doi: 10.1088/1742-6596/1535/1/012051

40. Mainprize JG, Mawdsley GE, Carton A-K, et al. Full-size anthropomorphic phantom for 2D and 3D breast x-ray imaging. *Proceedings of the SPIE*. 2020;11513:17. doi: 10.1117/12.2560358

41. Filippou V, Tsoumpas C. Recent advances on the development of phantoms using 3D printing for imaging with CT, MRI, PET, SPECT, and ultrasound. *Medical Physics.* 2018;45(9):e740–e760. doi: 10.1002/mp.13058

42. di Franco F, Mettivier G, Sarno A, Varallo A, Russo P. Manufacturing of physical breast phantoms with 3D printing technology for X-ray breast imaging. *2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC).* 2019:1–5. doi: 10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059986

43. Sage J, Fezzani KL, Fitton I, et al. Experimental evaluation of seven quality control phantoms for digital breast tomosynthesis. *Physica Medica*. 2019;57:137–144. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.12.031

44. Freed M, Badal A, Jennings RJ, et al. X-ray properties of an anthropomorphic breast phantom for MRI and x-ray imaging. *Physics in medicine and biology.* 2011;56(12):3513–3533. doi: 10.1088/0031-9155/56/12/005

45. Ruvio G, Solimene R, Cuccaro A, et al. Multimodal Breast Phantoms for Microwave, Ultrasound, Mammography, Magnetic Resonance and Computed Tomography Imaging. *Sensors.* 2020;20(8):2400. doi: 10.3390/s20082400

46. Baldelli P, Phelan N, Egan G. Investigation of the effect of anode/ filter materials on the dose and image quality of a digital mammography system based on an amorphous selenium flat panel detector. *Br J Radiol.* 2010;83(988):290–295. doi: 10.1259/bjr/60404532

47. Park S, Jennings R, Liu H, Badano A, Myers K. A statistical, taskbased evaluation method for three-dimensional x-ray breast imaging systems using variable-background phantoms. *Medical Physics*. 2010;37(12):6253–6270. doi: 10.1118/1.3488910

48. Taibi A, Fabbri S, Baldelli P, et al. Dual-energy imaging in fullfield digital mammography: a phantom study. *Physics in medicine and biology.* 2003;48(13):1945–1956. doi: 10.1088/0031-9155/48/13/307 **49.** Cockmartin L, Marshall N, Bosmans H. Design and Evaluation of a Phantom with Structured Background for Digital Mammography and Breast Tomosynthesis. In: Maidment ADA, Bakic PR, Gavenonis S, editors. *Breast Imaging. IWDM 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7361.* Berlin: Springer; 2012. doi: 10.1007/978-3-642-31271-7_83

50. Baneva Y, Bliznakova K, Cockmartin L, et al. Evaluation of a breast software model for 2D and 3D X-ray imaging studies of the breast. *Physica Medica*. 2017;41:78–86. doi: 10.1016/j.ejmp.2017.04.024

51. Bliznakova K. Development of breast software phantom dedicated for research and educational purposes. *RAD Association Journal.* 2017;2(1):14–19. doi: 10.21175/RadJ.2017.01.004

52. Marinov S, Carton A-K, Cockmartin L, et al. Evaluation of the visual realism of breast texture phantoms in digital mammography. *Proc. SPIE 11513, 15th International Workshop on Breast Imaging (IWBI2020).* 2020. doi: 10.1117/12.2564124

53. Feradov F, Marinov S, Bliznakova K. Physical Breast Phantom Dedicated for Mammography Studies. In: Henriques J, Neves N, de Carvalho P, editors. *XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing – MEDICON 2019. MEDICON 2019. IFMBE Proceedings.* 2020;76:344–352. doi: 10.1007/978-3-030-31635-8_41

54. Bliznakova K, Mettivier G, Russo P, Bliznakov Zh. Validation of a software platform for 2D and 3D phase contrast imaging: preliminary subjective evaluation. *15th International Workshop on Breast Imaging (IWBI2020).* 2020:97. doi: 10.1117/12.2564356

55. Bliznakova K, Mettivier G, Russo P, et al. A software platform for phase contrast x-ray breast imaging research. *Comput Biol Med.* 2015;61:62–74. doi: 10.1016/j.compbiomed.2015.03.017

56. Petrov D, Marshall NW, Young KC, Bosmans H. Systematic approach to a channelized Hotelling model observer implementation

REVIEWS

for a physical phantom containing mass-like lesions: Application to digital breast tomosynthesis. *Physica Medica*. 2019;58:8–20. doi: 10.1016/j.ejmp.2018.12.033

57. Mettivier G, Bliznakova K, Sechopoulos I, et al. Evaluation of the BreastSimulator Software Platform for Breast Tomography: Preliminary Results. *Physics in Medicine and Biology*. 2016;62(16):145–151. doi: 10.1088/1361-6560/aa6ca3

58. Salomon E, Semturs F, Unger E, et al. Equivalent breast thickness and dose sensitivity of a next iteration 3D structured breast phantom with lesion models. *Medical Imaging 2020: Physics of Medical Imaging.* 2020. doi: 10.1117/12.2548956

59. Carton AK, Bakic P, Ullberg C, Derand H, Maidment AD. Development of a physical 3D anthropomorphic breast phantom. *Medical Physics.* 2011;38(2):891–896. doi: 10.1118/1.3533896

60. Mainprize JG, Carton A-K, Klausz R, et al. Development of a physical 3D anthropomorphic breast texture model using selective laser sintering rapid prototype printing. *Medical Imaging 2018: Physics of Medical Imaging.* 2018:9. doi: 10.1117/12.2560358

61. Li Z, Desolneux A, Muller S, Carton A-K. A Novel 3D Stochastic Solid Breast Texture Model for X-Ray Breast Imaging. In: Tingberg A, Lång K, Timberg P, editors. *Breast Imaging. IWDM 2016. Lecture Notes in Computer Science, vol 9699.* Springer; 2016. P. 660–667. doi: 10.1007/978-3-319-41546-8_822016

62. Prionas ND, Burkett GW, McKenney SE, et al. Development of a patient-specific two-compartment anthropomorphic breast phantom. *Physics in medicine and biology*. 2012;57(13):4293–4307. doi: 10.1088/0031-9155/57/13/4293

63. Badal A, Clark M, Ghammraoui B. Reproducing two-dimensional mammograms with three-dimensional printed phantoms. *Journal of Medical Imaging.* 2018;5(3). doi: 10.1117/1.JMI.5.3.033501

64. Schopphoven S, Cavael P, Bock K, Fiebich M, Mäder U. Breast phantoms for 2D digital mammography with realistic anatomical structures and attenuation characteristics based on clinical images using 3D printing. *Physics in medicine and biology.* 2019;64(21). doi: 10.1088/1361-6560/ab3f6a

65. Clark M, Ghammraoui B, Badal A. Reproducing 2D breast mammography images with 3D printed phantoms. *Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging.* 2016;9783. doi: 10.1117/12.2217215
66. Okkalidis N. A novel 3D printing method for accurate anatomy replication in patient-specific phantoms. *Medical Physics.* 2018;45(10):4600–4606. doi: 10.1002/mp.13154

67. Daskalov S, Okkalidis N, Boone JM, et al. Anthropomorphic Physical Breast Phantom Based on Patient Breast CT Data: Preliminary Results. In: Henriques J, Neves N, de Carvalho P, editors. XV Mediterranean Conference on Medical and Biological Engineering and Computing – MEDICON 2019. MEDICON 2019. IFMBE Proceedings, vol 76. Springer; 2020. P. 367–374. doi: 10.1007/978-3-030-31635-8_442020

68. Kiarashi N, Nolte AC, Sturgeon GM, et al. Development of realistic physical breast phantoms matched to virtual breast phantoms based on human subject data. *Medical Physics.* 2015;42(7):4116–4126. doi: 10.1118/1.4919771

69. Lindfors KK, Boone JM, Nelson TR, et al. Dedicated Breast CT: Initial Clinical Experience. *Radiology.* 2008;246(3):725–733. doi: 10.1148/radiol.2463070410

70. Burgess AE, Judy PF. Signal detection in power-law noise: effect of spectrum exponents. *Journal of the Optical Society of America A.* 2007;24(12):B52–B60. doi: 10.1364/JOSAA.24.000B52

71. Burgess AE, Jacobson FL, Judy PF. Human observer detection experiments with mammograms and power-law noise. *Medical Physics.* 2001;28(4):419–437. doi: 10.1118/1.1355308

72. Rossman AH, Catenacci M, Zhao C, et al. Three-dimensionallyprinted anthropomorphic physical phantom for mammography and digital breast tomosynthesis with custom materials, lesions, and uniform quality control region. *Journal of Medical Imaging.* 2019;6(2). doi: 10.1117/1.JMI.6.2.021604

73. Mettivier G, Sarno A, Boone JM, et al. Virtual clinical trials in 3D and 2D breast imaging with digital phantoms derived from clinical breast CT scans. *Medical Imaging 2020: Physics of Medical Imaging.* 2020. doi: 10.1117/12.2548224

74. Mettivier G, Sarno A, di Franco F, et al. The Napoli-Varna-Davis project for virtual clinical trials in X-ray breast imaging. *2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC).* 2019:1–5. doi: 10.1109/NSS/MIC42101.2019.9059828

75. Ikejimba LC, Graff CG, Rosenthal S, et al. A novel physical anthropomorphic breast phantom for 2D and 3D x-ray imaging. *Medical Physics.* 2017;44(2):407–416. doi: 10.1002/mp.12062

76. Mei K, Geagan M, Roshkovan L, et al. Three-dimensional printing of patient-specific lung phantoms for CT imaging: Emulating lung tissue with accurate attenuation profiles and textures. *Medical Physics.* 2022;49(2):825–835. doi: 10.1002/mp.15407

77. Ionita CN, Mokin M, Varble N, et al. Challenges and limitations of patient-specific vascular phantom fabrication using 3D Polyjet printing. *Proceedings of SPIE--the International Society for Optical Engineering.* doi: 10.1117/12.2042266

78. Theodorakou C, Horrocks JA, Marshall NW, Speller RD. A novel method for producing x-ray test objects and phantoms. *Physics in medicine and biology.* 2004;49(8):1423–1438. doi: 10.1088/0031-9155/49/8/004

79. Sikaria D, Musinsky S, Sturgeon GM, et al. Second generation anthropomorphic physical phantom for mammography and DBT: Incorporating voxelized 3D printing and inkjet printing of iodinated lesion inserts. *Proc. SPIE 9783, Medical Imaging 2016: Physics of Medical Imaging.* 2016. doi: 10.1117/12.2217667

80. Jahnke P, Limberg FR, Gerbl A, et al. Radiopaque Threedimensional Printing: A Method to Create Realistic CT Phantoms. *Radiology.* 2017;282(2):569–575. doi: 10.1148/radiol.2016152710

81. de Sisternes L, Brankov JG, Zysk AM, et al. A computational model to generate simulated three-dimensional breast masses. *Medical Physics.* 2015;42(2):1098–1118. doi: 10.1118/1.4905232

82. SUN NUCLEAR. BR3D BREAST IMAGING PHANTOM [Internet] [cited 1 Jan 2023]. Available from: https://www.cirsinc.com/ products/mammography/br3d-breast-imaging-phantom/

83. Piccolomini EL, Morotti E. A Model-Based Optimization Framework for Iterative Digital Breast Tomosynthesis Image Reconstruction. *Journal of imaging.* 2021;7(2):36. doi: 10.3390/jimaging7020036

84. Cavicchioli R, Hu JC, Loli Piccolomini E, Morotti E, Zanni L. GPU acceleration of a model-based iterative method for Digital Breast Tomosynthesis. *Scientific reports.* 2020;10(1):43. doi: 10.1038/s41598-019-56920-y

85. Gomi T, Kijima Y, Kobayashi T, Koibuchi Y. Evaluation of a Generative Adversarial Network to Improve Image Quality and Reduce Radiation-Dose during Digital Breast Tomosynthesis. *Diagnostics*. 2022;12(2):495. doi: 10.3390/diagnostics12020495

86. Cockmartin L, Bosmans H, Marshall NW. Establishing a quality control protocol for dual-energy based contrast-enhanced digital mammography. *Proceedings of the SPIE.* 2021;11595. doi: 10.1117/12.2581816

87. Marimón E, Marsden PA, Nait-Charif H, Díaz O. A semiempirical model for scatter field reduction in digital

AUTHORS' INFO

* Anastasia A. Nasibullina;

address: 24/1 Petrovka street, 127051, Moscow, Russia ORCID: 0000-0003-1695-7731; eLibrary SPIN: 2482-3372; e-mail: NasibullinaAA@zdrav.mos.ru

Yuriy A. Vasilev, MD, Cand. Sci. (Med.); ORCID: 0000-0002-5283-5961; eLibrary SPIN: 4458-5608; e-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru

Olga V. Omelyanskaya; ORCID: 0000-0002-0245-4431; eLibrary SPIN: 8948-6152; e-mail: Omelyanskaya0V@zdrav.mos.ru

Denis V. Leonov, Cand. Sci. (Tech.); ORCID: 0000-0003-0916-6552; eLibrary SPIN: 5510-4075; e-mail: LeonovDV2@zdrav.mos.ru

Julia V. Bulgakova; ORCID: 0000-0002-1627-6568; eLibrary SPIN: 8945-6205; e-mail: BulgakovaYV@zdrav.mos.ru

Dina A. Akhmedzyanova, MD; ORCID: 0000-0001-7705-9754; eLibrary SPIN: 6983-5991; e-mail: AkhmedzyanovaDA@zdrav.mos.ru

Yuliya F. Shumskaya, MD; ORCID: 0000-0002-8521-4045; eLibrary SPIN: 3164-5518; e-mail: shumskayayf@zdrav.mos.ru

Roman V. Reshetnikov, Cand. Sci. (Phys. and Math.); ORCID: 0000-0002-9661-0254; eLibrary SPIN: 8592-0558; e-mail: r.reshetnikov@npcmr.ru

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку

mammography. *Physics in medicine and biology.* 2021;66(4). doi: 10.1088/1361-6560/abd231

88. Silver EH, Shulman SD, Rehani MM. Innovative monochromatic x-ray source for high-quality and low-dose medical imaging. *Medical Physics.* 2021;48(3):1064–1078. doi: 10.1002/mp.14677

ОБ АВТОРАХ

* Насибуллина Анастасия Александровна;

адрес: Россия, 127051, Москва, ул.Петровка, д.24, стр. 1; ORCID: 0000-0003-1695-7731; eLibrary SPIN: 2482-3372; e-mail: NasibullinaAA@zdrav.mos.ru

Васильев Юрий Александрович, канд. мед. наук; ORCID: 0000-0002-5283-5961; eLibrary SPIN: 4458-5608; e-mail: VasilevYA1@zdrav.mos.ru

Омелянская Ольга Васильевна; ORCID: 0000-0002-0245-4431; eLibrary SPIN: 8948-6152; e-mail: Omelyanskaya0V@zdrav.mos.ru

Леонов Денис Владимирович, канд. техн. наук; ORCID: 0000-0003-0916-6552; eLibrary SPIN: 5510-4075; e-mail: LeonovDV2@zdrav.mos.ru

Булгакова Юлия Владиславовна; ORCID: 0000-0002-1627-6568; eLibrary SPIN: 8945-6205; e-mail: BulgakovaYV@zdrav.mos.ru

Ахмедзянова Дина Альфредовна; ORCID: 0000-0001-7705-9754; eLibrary SPIN: 6983-5991; e-mail: AkhmedzyanovaDA@zdrav.mos.ru

Шумская Юлия Федоровна; ORCID: 0000-0002-8521-4045; eLibrary SPIN: 3164-5518; e-mail: shumskayayf@zdrav.mos.ru

Решетников Роман Владимирович, канд. ф.-м. наук; ORCID: 0000-0002-9661-0254; eLibrary SPIN: 8592-0558; e-mail: r.reshetnikov@npcmr.ru

REVIEWS