

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD687472>

EDN: DKWJWX



Разработка и апробация антропоморфного алюминиевого фантома для цифровой рентгенографии органов грудной клетки: технический отчёт

В.И. Классен¹, И.А. Просвиркин¹, И.С. Носков¹, Ю.Т. Гогоберидзе², А.В. Петряйкин³,
О.В. Омелянская³, Р.А. Ерижоков³

¹ Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева-КАИ, Чистополь, Россия;

² ФтизисБиоМед, Чистополь, Россия;

³ Научно-практический клинический центр диагностики и телемедицинских технологий, Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Обоснование. Регламентированная процедура контроля качества выполнения рентгенографии предполагает анализ тест-объектов без имитации анатомических особенностей. Тем не менее для последующей оценки качества работы врачей-рентгенологов или систем поддержки принятия решений с применением искусственного интеллекта предполагают использование размеченных несколькими специалистами выборок данных анонимизированных исследований реальных пациентов. Сбор таких датасетов трудоёмкий и длительный процесс, особенно если стоит задача сформировать выборку с реальными случаями патологий. Именно поэтому целесообразно использовать антропоморфные тест-объекты (фантомы) с возможностью имитации патологических признаков, рентгеновское изображение которых будет максимально приближено к анализируемым изображениям пациентов.

Цель работы. Разработка и апробация антропоморфного алюминиевого фантома для цифровой рентгенографии.

Методы. В качестве эталона при проектировании фантома использовали цифровую рентгенограмму органов грудной клетки здорового человека. Образец спроектированного фантома изготовили методом послойного фрезерования алюминиевой заготовки. Валидация проведена посредством сравнения снимков фантома и эталонного изображения. Кроме того, оценивали влияние образца фантома на пространственное разрешение и контрастную чувствительность для различных режимов съёмки рентгеновского аппарата. Изучали применимость фантома для моделирования очагового поражения лёгких с оценкой результатов экспертами.

Результаты. Установлено, что фантом с высокой степенью достоверности воспроизводит эталонное изображение и позволяет имитировать патологические изменения на рентгенограммах органов грудной клетки путём размещения в необходимой позиции пластичных накладок. Кроме того, выявлены отношения коэффициентов ослабления для разных анатомических областей при рентгенографии фантома и трёх пациентов.

Заключение. В работе представлен метод разработки антропоморфного фантома из алюминиевого сплава Д16Т, предназначенного для создания объёмного образца, воспроизводящего рентгеновское изображение-прототип с высокой степенью достоверности и имитирующее соответствующие анатомические структуры при проведении рентгенографического исследования. Разработанный фантом моделирует анатомию органов грудной клетки, включая патологические изменения, в частности очаговые образования. К основным преимуществам предложенного решения относят снижение производственных затрат, компактность конструкции и высокую точность воспроизведения рентгенографических характеристик.

Ключевые слова: антропоморфный фантом; цифровая рентгенография; имитационное моделирование; технический отчёт.

Как цитировать:

Классен В.И., Просвиркин И.А., Носков И.С., Гогоберидзе Ю.Т., Петряйкин А.В., Омелянская О.В., Ерижоков Р.А. Разработка и апробация антропоморфного алюминиевого фантома для цифровой рентгенографии органов грудной клетки: технический отчёт // Digital Diagnostics. 2026. Т. 7, № 1. С. 55–66. DOI: 10.17816/DD687472 EDN: DKWJWX

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD687472>

EDN: DKWJWX

Development and Testing of an Anthropomorphic Aluminum Phantom for Digital Chest Radiography: A Technical Report

Victor I. Klassen¹, Ilya A. Prosvirkin¹, Ilya S. Noskov¹, Yury T. Gogoberidze², Alexey V. Petryaikin³, Olga V. Omelyanskaya³, Rustam A. Erizhokov³

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Chistopol, Russia;

² PhthisisBioMed, Chistopol, Russia;

³ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

ABSTRACT

BACKGROUND: The regulated quality control procedure for radiography involves the analysis of test objects without simulating anatomical features. However, subsequent assessment of radiologists' performance or artificial intelligence-based decision support systems requires anonymized data samples from real patients annotated by multiple specialists. Collecting such datasets is a labor-intensive and time-consuming process, especially when we need a sample containing actual pathologies. Therefore, it is advisable to use anthropomorphic test objects (phantoms) which simulate pathological findings, so that the X-ray image will be as close as possible to the analyzed images of patients.

AIM: To develop and test an anthropomorphic aluminum phantom for digital radiography.

METHODS: A digital radiograph of the chest of a healthy person was used as a reference standard during phantom design. A sample of the designed phantom was made using layer-by-layer milling of an aluminum blank. Validation was carried out by comparing phantom images and the reference image. In addition, the effect of the phantom sample on the spatial resolution and contrast sensitivity was assessed for different acquisition modes of the X-ray unit. The applicability of the phantom for simulating focal lung lesions was studied, with the results evaluated by experts.

RESULTS: The phantom was found to reproduce the reference image with a high fidelity and allows simulation of pathological changes in chest X-rays by placing flexible pads in the required positions. The ratios of attenuation coefficients for different anatomical areas were identified during X-ray imaging of the phantom and three patients.

CONCLUSION: This work presents a method for developing a high-fidelity anthropomorphic phantom made of D16T aluminum alloy, designed for calibrating X-ray systems and testing radiologists. The phantom imitates the anatomical structures of the chest organs and pathological changes, such as focal lesions. The main advantages of this solution include reduced production costs, compact design, and high accuracy of reproduction of radiographic characteristics.

Keywords: radiologic phantom; medical imaging; equipment design; technical report.

To cite this article:

Klassen VI, Prosvirkin IA, Noskov IS, Gogoberidze YuT, Petryaikin AV, Omelyanskaya OV, Erizhokov RA. Development and Testing of an Anthropomorphic Aluminum Phantom for Digital Chest Radiography: A Technical Report. *Digital Diagnostics*. 2026;7(1):55–66. DOI: 10.17816/DD687472 EDN: DKWJWX

Submitted: 14.07.2025

Accepted: 20.01.2026

Published online: 26.02.2026

DOI: <https://doi.org/10.17816/DD687472>

EDN: DKWJWX

胸部器官数字化X线摄影用拟人化铝制体模的开发与验证： 技术报告

Viktor I. Klassen¹, Ilya A. Prosvirkin¹, Ilya S. Noskov¹, Yury T. Gogoberidze², Alexey V. Petryaikin³,
Olga V. Omelyanskaya³, Rustam A. Erizhokov³

¹ Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Chistopol, Russia;

² PhthisisBioMed, Chistopol, Russia;

³ Research and Practical Clinical Center for Diagnostics and Telemedicine Technologies, Moscow, Russia

摘要

论证：规范的X线摄影质量控制程序要求分析不模拟解剖特征的测试对象。然而，为后续评估放射科医师工作质量或应用人工智能的决策支持系统，建议使用多位专家标注的匿名化真实患者研究数据集。收集此类数据集耗时且过程漫长，特别是在需要形成包含真实病理病例的样本时。因此，合理使用能够模拟病理特征、其X线图像与患者分析图像最大限度接近的拟人化测试对象（体模）是明智之举。

目的：开发与验证用于数字化X线摄影的拟人化铝制体模。

方法：设计体模时以健康人胸部器官的数字X线片作为标准。采用分层铣削铝坯的方法制作设计体模的样本。通过比较体模图像与标准图像进行验证。此外，还评估了体模样本对不同X光机拍摄模式的空间分辨率和对比度敏感性的影响。研究了体模在模拟肺部局灶性病变以及专家评估结果方面的适用性。

结果：经证实，具有高可信度的模型能够复制标准图像，并通过在必要位置放置塑料贴片来模拟胸部器官X光片上的病理变化。此外，还揭示了在模型和三名患者进行X光摄影时不同解剖区域的衰减系数之间的关系。

结论：研究中提出了一种开发铝合金Д16Т拟人化体模的方法，该模型专为创建体积样本而设计，能够以高可信度再现X射线图像原型，并在进行X射线摄影研究时模拟相应的解剖结构。开发的模型模拟了胸部器官的解剖结构，包括病理变化，特别是灶性病变。所提出解决方案的主要优势包括降低生产成本、结构紧凑性以及再现X射线特性的高精度。

关键词：拟人化体模；数字X射线摄影；模拟建模；技术报告。

引用本文：

Klassen VI, Prosvirkin IA, Noskov IS, Gogoberidze YuT, Petryaikin AV, Omelyanskaya OV, Erizhokov RA. 胸部器官数字化X线摄影用拟人化铝制体模的开发与验证：技术报告. *Digital Diagnostics*. 2026;7(1):55–66. DOI: 10.17816/DD687472 EDN: DKWJWX

收到：14.07.2025

接受：20.01.2026

发布日期：26.02.2026

ОБОСНОВАНИЕ

В России, как и во всём мире, отмечают тенденцию к цифровизации здравоохранения, в частности внедрение инновационных технических решений в работу служб лучевой диагностики. Так, цифровая рентгенография (взамен аналоговой) давно находит своё применение в повседневной практике амбулаторных учреждений, являясь также одним из основных диагностических методов в составе профилактических исследований [1]. Несмотря на перераспределение внутри структуры парка оборудования для лучевой диагностики, рентгеновские аппараты и флюорографы в 2022 году в Москве всё ещё составляли наибольшую долю всех единиц оборудования [2]. Дополнительное направление цифровизации — внедрение технологий искусственного интеллекта (ИИ), который, в свою очередь, может быть использован в качестве системы поддержки принятия врачебных решений, триажа исследований¹, а также улучшения качества медицинских диагностических изображений. В перспективе же системы ИИ возможно использовать для проведения автономной сортировки результатов профилактических исследований, однако это требует надлежащих методов оценки и контроля их качества [3].

Проведение любых исследований в лучевой диагностике, не имеющих прямой диагностической или терапевтической цели для конкретного пациента, строго регламентировано в связи с этическими принципами и необходимостью минимизации радиационного воздействия².

Следовательно, участие пациентов для целенаправленного формирования выборок с целью тестирования технических аспектов систем ИИ не представляется возможным. Существующие подходы к формированию анонимизированных выборок из архивов медицинских изображений также не позволяют сформировать статистически значимые выборки заранее заданной конфигурации (например, с заданными размерами очаговых изменений и локализацией достаточно большого размера).

Именно поэтому, по нашему мнению, целесообразно использовать антропоморфные тест-объекты (фантомы) с возможностью имитации патологических признаков, рентгеновское изображение которых будет максимально приближено к анализируемым изображениям пациентов.

На данный момент существует несколько коммерчески доступных фантомов, имитирующих органы грудной клетки, которые возможно использовать как в рентгенографии, так и в компьютерной томографии^{3,4,5,6,7}. Наиболее известным из них является Lungman® (Kyoto Kagaku, Япония)⁸, который, несмотря на высокоточную имитацию структур грудной клетки, имеет недостатки в практическом использовании, а именно высокую стоимость, связанную, по нашему мнению, с конструктивной сложностью изделия. Таким образом, представляется актуальной разработка антропоморфных анатомически корректных фантомов, использующих меньшее количество затрачиваемых в производстве труднодоступных, дорогостоящих материалов и технологий, которые могли бы использовать как для независимой оценки качества выполнения рентгенодиагностических процедур, так и калибровки и/или тестирования систем ИИ.

ЦЕЛЬ

Разработка и апробация антропоморфного алюминиевого фантома для цифровой рентгенографии органов грудной клетки.

МЕТОДЫ

Проектирование и производство фантома

Основной методикой имитации рентген-позитивных структур для создания фантома является послойное фрезерование алюминиевой заготовки. Её выполнили из сплава алюминия Д16Т. Зависимость между толщиной материала (в мм) и яркостью пикселя (в единицах шкалы оттенков серого) на рентгеновском изображении

¹ Триаж (от франц. triage — сортировка) исследований — процесс определения приоритетности внимания врача-рентгенолога для очередности интерпретации.

² Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации № 47 от 7 июля 2009 г. «Об утверждении санитарных правил и нормативов 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009». Режим доступа: <https://base.garant.ru/4188851/53f89421bbdaf741eb2d1ecc4ddb4c33/> Дата обращения: 17.02.2026.

³ Quattro Respiratory Motion Phantom [Internet]. Режим доступа: <https://leedstestobjects.com/index.php/phantom/quattro/> Дата обращения: 08.02.2026.

⁴ Dynamic Thorax Phantom [Internet]. Режим доступа: <https://www.sunuclear.com/uploads/documents/> Дата обращения: 08.02.2026.

⁵ Патент РФ на полезную модель № 234469/ 28.05.2025. Бюл. № 16. Васильев Ю.А., Омелянская О.В., Коденко М.Р., и др. Фантом кавернозного туберкулёза лёгких для компьютерно-томографических исследований. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet Дата обращения: 08.02.2026.

⁶ Sun Nuclear Corporation ATOM Phantom Family [Internet]. Режим доступа: <https://www.sunuclear.com/products/atom-phantom-family> Дата обращения: 08.02.2026.

⁷ Multipurpose Chest Phantom N1 “LUNGMAN” [Internet]. В: Kyoto Kagaku. Режим доступа: https://www.kyotokagaku.com/en/products_data/ph-1_01/ Дата обращения: 08.02.2026.

⁸ Фантом грудной клетки PET/SPECT [Internet]. В: PhantomeLab. Режим доступа: <https://phantomlab.ru/product/fantom-grudnoy-kletki-pet-spect/> Дата обращения: 12.02.2026.

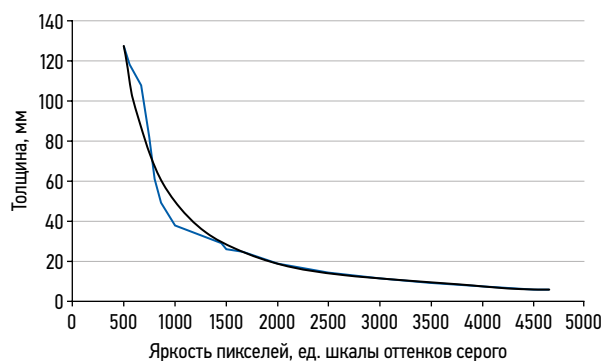


Рис. 1. Экспоненциальная линия аппроксимации зависимости толщины материала для сплава алюминия Д16Т от яркости пикселей [6].

определена экспериментально и наглядно представлена на графике (рис. 1).

В качестве эталона при проектировании фантома использовали цифровую рентгенограмму органов грудной клетки здоровой пациентки 22 лет, без патологических изменений (рис. 2). Эталонную рентгенограмму получили при прохождении стандартного профилактического осмотра с использованием малодозового флюорографа «ФЦМ-Альфа» (АО «Актюбрентген», Казахстан), она представлена в виде файла DICOM (Digital Imaging and Communications in Medicine). Применяли следующие параметры съёмки:

- напряжение — 110 кВ;
- произведение времени экспозиции на силу тока (экспозиция по току) — 10 мАс;
- доза излучения — 0,318 мЗв;
- размер рабочего поля — 400×400 мм.

Впоследствии данное изображение с использованием полученной зависимости преобразовано в 3D-модель (рис. 3).



Рис. 2. Эталонная цифровая рентгенограмма, использованная при разработке фантома [6].

Финальная модель фантома на основе полученной 3D-модели произведена методом послойного фрезерования с использованием фрезерного станка с числовым программным управлением MDX-540® (Roland, Япония). Готовый фантом представлен на рис. 4.

Апробация фантома и оценка результирующих рентгенограмм

При апробации предполагалось выполнение качественной и количественной оценки получаемых рентгеновских изображений. Апробационные цифровые рентгенограммы получены на рентгеновском аппарате типа U-дуга «Ренекс-РЦ» (ООО «С.П.Гелпик», Россия). Съёмку

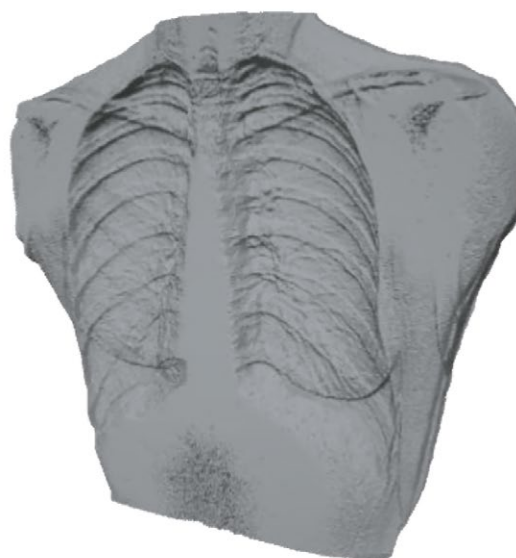
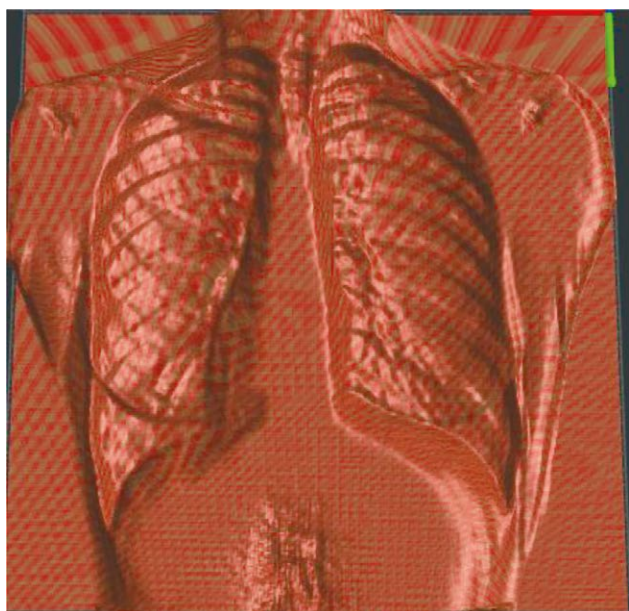


Рис. 3. 3D-модель для производства фантома [6].



Рис. 4. Итоговый образец разработанного рентгеновского алюминиевого фантома.

выполняли в трёх стандартных режимах, предусмотренных фирмой-производителем, для пациентов с различным телосложением (астеническим, нормостеническим и гиперстеническим). Автоэкспонометр не использовали, применяли фиксированные параметры, представленные в табл. 1.

Осуществляли качественную визуальную (субъективную) оценку соответствия рентгеновского изображения, полученного с использованием фантома, эталонному изображению. В оценке участвовали два независимых врача-рентгенолога со стажем работы 10 и 33 года.

Оценивали влияние фантома на пространственное разрешение и контрастную чувствительность для различных

рентгенографических режимов с использованием дополнительных тест-объектов установленного образца. Для оценки контрастной чувствительности использован тест-объект ТКЧ-5 (НПП «Доза», Россия), для оценки пространственного разрешения — тест-объект ТПР-4-2 (НПП «Доза», Россия). Пороговую контрастную чувствительность устанавливали визуально как номинальное значение минимально различимых тестовых отверстий на тест-объекте и определяли в процентах. Максимальное пространственное разрешение устанавливали визуально по соответствующей на тест-объекте группе максимального количества пар линий с ясно различимым промежутком между ними и определяли как пары линий на мм. Методы определения данных параметров изображения соответствовали государственным стандартам Российской Федерации: ГОСТ Р МЭК 61223-2-9-2001⁹, ГОСТ Р МЭК 61223-2-11-2001¹⁰, ГОСТ Р МЭК 61223-3-1-2001¹¹.

Проводили сравнение коэффициентов ослабления рентгеновского излучения при исследовании фантомов и пациентов. В качестве группы сравнения использованы ретроспективно полученные цифровые рентгенограммы трёх пациентов, выполненные с использованием аналогичного оборудования. Осуществляли прямые сравнения данных показателей. Расчёты проводили для двух анатомических областей, а именно лёгочные поля и брюшная полость.

Измерения абсолютных значений сигнала на цифровых рентгенограммах (DICOM-файлы) проводили в программе RadiAnt DICOM Viewer® версии 2024.2 (Medixant, Польша). Для оценки влияния фантома на пространственное разрешение и контрастную чувствительность разных рентгенографических режимов использовали тест-объекты (рис. 5).

Таблица 1. Параметры съёмки изображения в зависимости от типа телосложения, используемые при стандартных режимах исследования пациентов

Напряжение, кВ	Расстояние «источник–приёмник», мм	Экспозиция по току, мАс	Ток, А	Время экспозиции, мс	Фильтр, мм Al
<i>Астенический тип</i>					
118	1500	2,4	429	5,6	2,5
<i>Нормостенический тип</i>					
118	1500	3,6	424	8,5	2,5
<i>Гиперстенический тип</i>					
119	1500	4,7	420	11,1	2,5

⁹ ГОСТ Р МЭК 61223-2-9-2001 от 14 мая 2002 г. «Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 2-9. Испытания на постоянство параметров. Аппараты для не прямой рентгеноскопии и не прямой рентгенографии». Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/6542/> Дата обращения: 08.02.2026.

¹⁰ ГОСТ Р МЭК 61223-2-11-2001 от 11 июня 2002 г. «Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 2-11. Испытания на постоянство параметров. Аппараты для общей прямой рентгенографии». Режим доступа: <https://internet-law.ru/gosts/gost/6896/> Дата обращения: 08.02.2026.

¹¹ ГОСТ Р МЭК 61223-3-1-2001 от 25 июня 2002 г. «Оценка и контроль эксплуатационных параметров рентгеновской аппаратуры в отделениях (кабинетах) рентгенодиагностики. Часть 3-1. Характеристики изображений рентгеновских аппаратов для рентгенографии и рентгеноскопии. Приёмочные испытания». Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Index/6/6884.htm> Дата обращения: 08.02.2026.

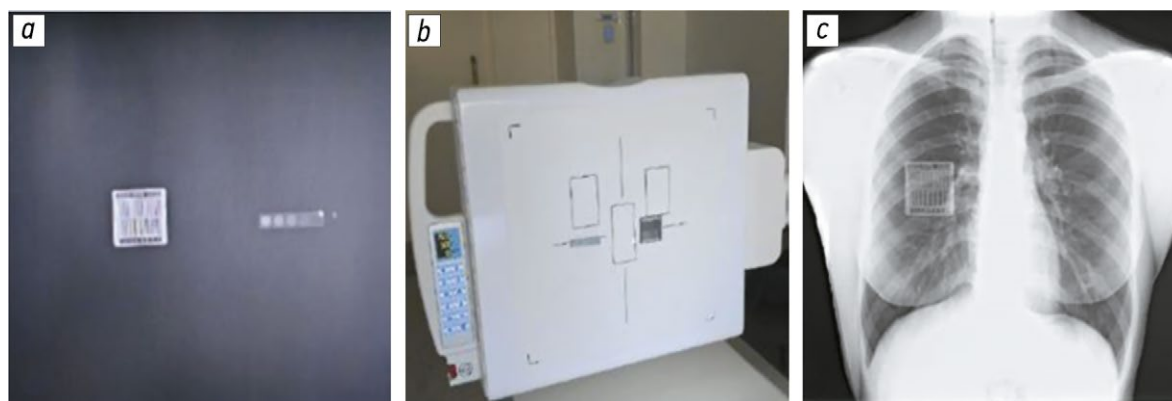


Рис. 5. Тест-объекты для оценки влияния на контрастность и пространственное разрешение: *a* — рентгенография тест-объектов; *b* — расположение тест-объектов за приёмником; *c* — рентгенограмма фантома с одновременным расположением тест-объектов.

Выбранные параметры изображения измеряли в автоматическом режиме аппарата с фиксированными настройками со следующим расположением тест-объектов:

- тест-объекты на приёмнике без фантома;
- тест-объекты на приёмнике за фантомом — лёгочные поля;
- тест-объекты на приёмнике за фантомом — брюшная полость.

Апробация фантома для моделирования очаговой патологии лёгких

Оценивали применимость фантома для моделирования процесса рентгенографии органов грудной клетки в прямой проекции в норме, а также для моделирования очагового поражения лёгких, результаты анализировали эксперты. В качестве объектов, имитирующих патологические образования, использовали гомогенную композитную смесь органических материалов с порошком гипса (CaSO_4), характеристики которой представлены в табл. 2.

Анализ полученных изображений проводили два эксперта независимо и однократно. Изображения с заведомо не визуализируемыми объектами (очаги 3,8 мм, расположенные на периферии) не анализировали, поскольку они выходят за пределы возможностей визуализации.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Спроектированный фантом изготовлен из сплава алюминия D16T, его масса составила 6,75 кг¹². Конструкция обеспечивает моделирование органов грудной клетки при выполнении рентгенологических исследований. Полученное рентгеновское изображение (рис. 6, *a*) с высокой степенью достоверности соответствует эталонному образцу (см. рис. 6, *b*).

Созданный рентгенологический фантом позволяет имитировать патологические изменения, связанные с «плюс-тенью» на рентгеновском изображении путём размещения в необходимой позиции пластичных накладок.

На рис. 7 представлен фантом и его рентгенограмма с фиксированными кальцийсодержащими тест-объектами, имитирующими кальцинированные очаги диаметром 10 мм. Кальцийсодержащие тест-объекты при имитации лёгочных очагов расположены в шестом межреберье, в срединных отделах. Позиционирование фантома и коллимирование выполнены без технических сложностей.

При анализе рентгеновского изображения фантома определено хорошее общее визуальное сходство с нативным исследованием органов грудной клетки женщины, выполненным при сканировании с отведением лопаток (визуализированы контуры молочных желёз, тени лопаток не прослеживаются). Тем не менее ввиду конструктивных особенностей фантома на результирующих рентгеновских

Таблица 2. Характеристики кальцийсодержащих тест-объектов, имитирующих частично кальцинированные очаги лёгких

Имитация очагов	Плотность, г/мл	Объёмная концентрация гипса, мг/мл	Массовая концентрация гипса, %	Рентгеновская плотность, НУ	Диаметр очагов, мм
Высокой плотности	1,38	293,6	21,2	291,3±5,5	20±1 10±0,3
Средней плотности	1,15	100,0	8,5	113,8±7,1	5±0,3 3,8±0,3

Примечание. Напряжение 120 кВ, сила тока 200 мА (водное окружение).

¹² Патент РФ на изобретение № 2837295/ 28.03.2025. Бюл. № 10. Классен В.И., Просвиркин И.А., Носков И.С. Способ изготовления фантома для рентгенографии. Режим доступа: https://new.fips.ru/registers-doc-view/fips_servlet/TypeFile=html Дата обращения: 08.02.2026.

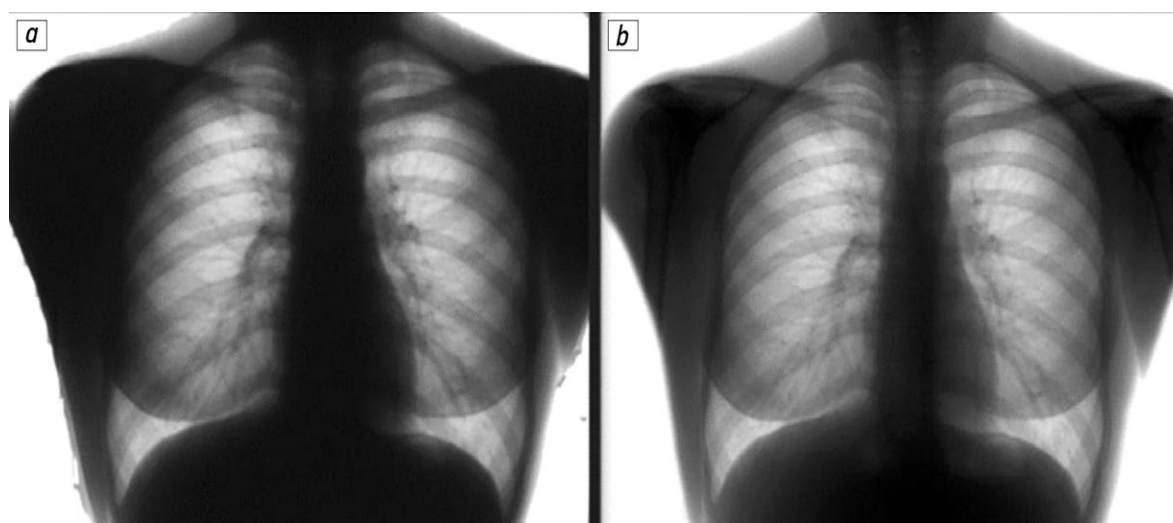


Рис. 6. Сравнение рентгенограмм фантома и прототипа, использованного для разработки [6]: *a* — рентгенограмма фантома; *b* — рентгенограмма-прототип.

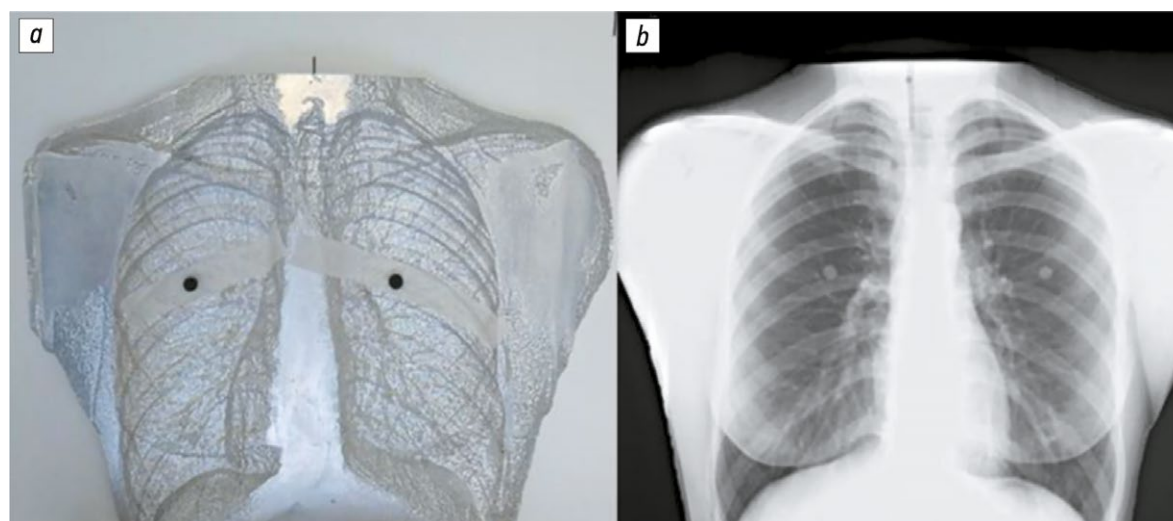


Рис. 7. Фантом (*a*) и его рентгенограмма (*b*) с фиксированными тест-объектами, имитирующими кальцинированные очаги диаметром 10 мм.

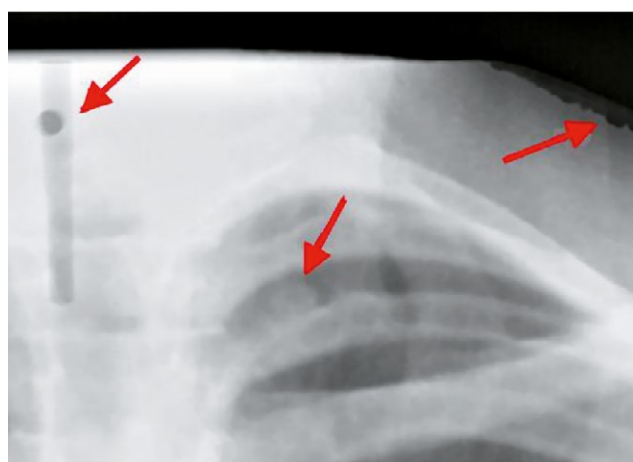


Рис. 8. Замечания по визуализации фантома: стрелка слева указывает на воздушный канал винта, стрелка справа — на неровные края фантома, стрелка по центру — на тень во втором межреберье слева.

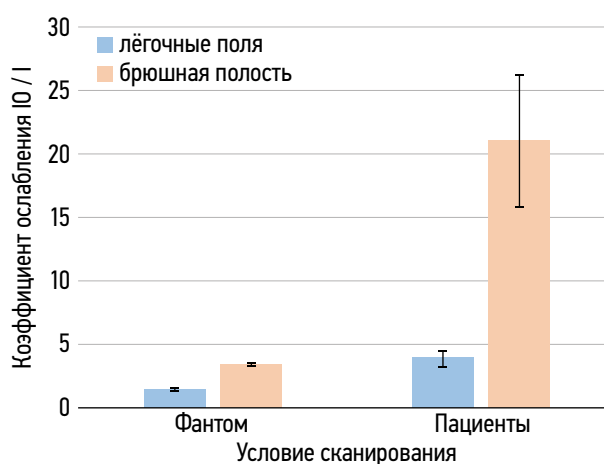


Рис. 9. Сравнительные результаты коэффициентов линейного ослабления (I/I) для фантома и пациентов.

Таблица 3. Результаты измерений контрастных и пространственных параметров рентгеновского изображения

Параметры	Расположение тест-объектов								
	На приёмнике			На приёмнике за фантомом лёгочных полей			На приёмнике за фантомом брюшной полости		
	20 мкЗв	30 мкЗв	40 мкЗв	20 мкЗв	30 мкЗв	40 мкЗв	20 мкЗв	30 мкЗв	40 мкЗв
Контрастная чувствительность, %	0,5	0,5	0,5	1,0	1,0	0,5	2,0	2,0	2,0
Пространственное разрешение, параллельные линии/мм	4,3	4,3	4,3	4,0	4,0	4,0	3,1	3,1	3,1

Таблица 4. Отношение коэффициентов ослабления для разных анатомических областей фантома относительно пациентов

Коэффициент ослабления	Брюшная полость/лёгочные поля		Пациенты/фантом	
	Фантом	Пациенты	Брюшная полость	Лёгочные поля
(I/I ₀)	2,352	5,365	6,008	2,634
[Ln (I/I ₀)]	3,141	2,231	2,412	3,397

Таблица 5. Результаты определения метрик точности по выявлению очаговой патологии при использовании фантома

Экспозиция по току, мАс	Тест-объект		Расположение тест-объекта	Эксперт 1		Эксперт 2	
	Слева	Справа		Слева	Справа	Слева	Справа
<i>Астеннический тип</i>							
2,4	—	—	Срединное	ИО	ИО	ИО	ИО
2,4	—	—	Срединное	ИО	ИО	ИО	ИО
2,4	5 (291)	5 (113)	Срединное	ИП	ИП	ИП	ИП
2,4	10 (291)	10 (113)	Срединное	ИП	ИП	ИП	ИП
2,4	3,8 (291)	3,8 (113)	Периферическое	—	—	—	—
2,4	10 (291)	10 (113)	Срединное	ИО	ИО	ИО	ИО
<i>Нормостенический тип</i>							
3,6	—	—	Срединное	ИО	ИО	ИО	ИО
3,6	—	—	Срединное	ИО	ИО	ИО	ИО
3,6	5 (291)	5 (113)	Срединное	ИП	ИП	ИП	ИП
3,6	10 (291)	10 (113)	Срединное	ИП	ИП	ИП	ИП
3,6	3,8 (291)	3,8 (113)	Срединное	ИП	ИП	ЛО	ЛО
<i>Гиперстенический тип</i>							
4,7	—	—	Срединное	ИО	ИО	ИО	ИО
4,7	—	—	Срединное	ИО	ИО	ИО	ИО
4,7	20 (291)	20 (113)	Срединное	ИП	ИП	ИП	ИП
4,7	5 (291)	5 (113)	Срединное	ИП	ИП	ИП	ИП
4,7	10 (291)	10 (113)	Срединное	ИП	ИП	ИП	ИП

Примечание. ИО — истинно отрицательное; ИП — истинно положительное; ЛО — ложноотрицательное.

изображениях выявлены и недостатки. Так, отмечен воздушный канал от винта по верхнему контуру в проекции трахеи. Кроме того, выявлены мелкобугристые, неровные края фантома, что связано с его производством с помощью процесса фрезерования. Также отмечена дополнительная тень во втором межреберье слева, не выявляемая на рентгенограмме-прототипе (рис. 8). В свою очередь, контуры сосудистого рисунка представлены несколько размытыми.

В табл. 3 продемонстрированы результаты измерений контрастной чувствительности и пространственного разрешения при различных расположениях тест-объектов.

Отношение коэффициентов ослабления для разных анатомических областей фантома относительно пациентов представлены в табл. 4. Сравнительные результаты коэффициентов линейного ослабления (I/I₀) для фантома и пациентов продемонстрированы на рис. 9. Так, видно, что у пациентов коэффициенты ослабления больше

как для лёгочных полей, так и для брюшной полости, при этом наиболее выражена разница между поглощением в области брюшной полости и лёгочными полями.

Распределение смоделированных очаговых объектов, а также подробная матрица ошибок для экспертов 1 и 2 представлены в табл. 5 в следующем формате:

- ИП — истинно положительные;
- ИО — истинно отрицательные;
- ЛО — ложноотрицательные;
- ЛП — ложноположительные.

Метрики точности для экспертов 1 и 2 составили соответственно:

- чувствительность — 100 и 87,5%;
- специфичность — 100 и 100%;
- точность — 100 и 93,33%.

Полученные результаты свидетельствуют о наиболее высокой точности по выявлению очаговой патологии экспертом 1. Метрики данного специалиста по визуализации лёгких (чувствительность, специфичность, точность) соответствовали 100%. Несколько менее точно очаги выявлял эксперт 2, не специализирующийся на лёгочной патологии. В частности, он не определил очаги малого размера (3,8 мм).

ОБСУЖДЕНИЕ

Современный рынок антропоморфных фантомов включает несколько компаний разработчиков главным образом из США и Японии. Следует отметить, что фантомы органов грудной клетки преимущественно предназначены для компьютерной томографии^{3,4,5} или же дозиметрии⁶. Аналогом разработанного алюминиевого фантома является многоцелевой фантом N1 Lungman (Kyoto Kagaku)⁷ [4, 5], однако предполагаемая конструкция обладает некоторыми существенными преимуществами. Так, в отличие от последнего, который воспроизводит анатомию в натуральную величину с использованием композитных материалов, предложенное решение обеспечивает сопоставимую точность имитации рентгенографических характеристик при низкой себестоимости производства. Важным преимуществом изделия является возможность локализации производства, поскольку опция использования доступных материалов (алюминий Д16Т) и стандартного оборудования с числовым программным управлением снижает зависимость от импортных компонентов. Более того, существенное снижение массогабаритных параметров по сравнению с аналогами (масса изделия составляет 6,75 кг, что на 63% меньше, чем у N1 Lungman⁷), позволяет упростить транспортировку и эксплуатацию.

Основной материал фантома, а именно алюминиевый сплав Д16Т, выбран с учётом определённых критериев:

- достаточная однородность структуры (минимизация возможных артефактов на результирующей рентгенограмме);
- плотность, обеспечивающая эквивалентное биологическим тканям ослабление излучения (2,8 г/см²);

- лёгкость обработки;
- экономичность.

Изготовление образца с учётом черновой и чистовой обработки заготовки заняло 300 ч. Такая продолжительность связана с использованием низкопроизводительного оборудования, используемого для прототипирования. Применение для изготовления фантома промышленных станков или использование альтернативных технологий позволит существенно сократить время изготовления.

Важным аргументом в пользу выбора сплава алюминия Д16Т стала свойственная ему рентгенопрозрачность, экспериментально подтверждённая [6]. Она обеспечивает формирование распределения яркости пикселей на рентгенографическом изображении в зависимости от толщины, что хорошо соответствует гистограмме распределения яркостей в 14-битной шкалы оттенков серого по всему динамическому диапазону рентгенограммы-прототипа.

Учитывая указанные в табл. 3 результаты, можно сделать вывод о том, что определение пространственного разрешения и контрастной чувствительности соответствует паспортным данным при расположении объектов на детекторе (с учётом разных показателей — 70 кВ при испытаниях, 120 кВ при текущем исследовании).

Также можно отметить незначительное снижение пространственного разрешения при исследовании за фантомом в области лёгочных полей и снижение контрастной чувствительности на 0,5% при исследовании в режиме 20 и 30 мЗв. Таким образом, имитация лёгочного рисунка и других структур обуславливает дополнительную погрешность при определении пространственного разрешения в области лёгочных полей.

Дополнительно можно наблюдать закономерное значительное снижение пространственного разрешения и контрастной чувствительности при исследовании за фантомом в области брюшной полости. При этом результаты не зависели от параметров съёмки (20, 30 и 40 мЗв).

Указанные данные в целом говорят о том, что хотя фантом достаточно хорошо имитирует относительный паттерн аттенюации сигнала по органам грудной клетки, что подтверждается визуально, коэффициент ослабления излучения, наблюдаемый при сканировании фантома (при 120 кВ) ниже по отношению к сканированию пациентов с нормостеническим типом телосложения. Для пациентов с гиперстеническим типом данные различия будут ещё более заметными. Вероятно, именно это привело к результатам оценки пространственного разрешения и контрастной чувствительности для лёгочных полей, близкой к измерениям в случае размещения тест-объектов на детекторе.

Кроме того, подход к оценке применимости фантома для моделирования процесса рентгенографии органов грудной клетки в прямой проекции не лишён недостатков: отсутствовала возможность использования различных прототипов для вариантов анатомической нормы. Аугментация нормальных состояний смоделирована путём разных условий съёмки и двойного предъявления одинаковых

изображений, что не является полностью корректным подходом. Имитацию очагов проводили посредством моделирования геометрически точных структур в одинаковых участках, не характерных для данной очаговой патологии.

Тем не менее апробация фантома экспертами рентгенологами подтвердила принципиальную возможность оценки эффективности выявления очаговой патологии при его использовании. Отмечены конструктивные недостатки, которые всё же не повлияли на заключение о том, что фантом достаточно хорошо имитирует относительный паттерн аттенюации рентгеновского излучения по органам грудной клетки. Преодолением же несоответствия коэффициентов ослабления фантома и реального объекта может быть увеличение толщины фантома — области, имитирующей грудную клетку — в 3,4 раза, а брюшной полости — в 2,6 раза (в среднем в 3 раза). Однако это закономерно приведёт к его утяжелению приблизительно в 3 раза, и масса фантома может достигать 21 кг, что станет критичным ограничением для его широкого внедрения.

Мы полагаем, что наиболее рациональным решением данного ограничения представляется учёт отмеченного несоответствия путём изготовления образцов патологических процессов и измерения пространственного разрешения и контрастной чувствительности с учётом полученных данных и поправки на выявленные несоответствия. Для повышения коэффициента поглощения можно рассмотреть добавку отдельного листа меди.

Другими важными ограничениями изделия являются возможность имитации только одной проекции, что исключает применение в компьютерной томографии, а также длительное время изготовления фантома.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Фантом обеспечивает достоверную имитацию рентгенографических исследований. Изделие позволяет моделировать различные патологические состояния и применять его для оценки диагностической точности специалистов и технологий ИИ.

Рентгенологические фантомы — широко используемый инструмент для решения различных задач в радиологии. Их применяют в научных исследованиях, образовательных процессах, при разработке и тестировании рентгенографического оборудования, а также новых протоколов сканирования. Кроме того, фантомы используют для валидации систем ИИ. Отметим, что лучшие образцы данной технологии являются точными анатомическими моделями торса в натуральную величину, тем не менее не позволяющими получить рентгенографическое изображение максимально до степени идентичности имитирующее реальные анатомические структуры.

Разработанный фантом является технологически уникальным решением, обеспечивающим необходимую визуализацию для моделирования различных патологических состояний, оценки точности экспертов и моделей ИИ, при низкой

себестоимости относительно аналогов. В дальнейшем планируется разработка дополнительных методик для повышения эффективности использования данной модели.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. В.И. Классен — концепция и планирование работы, редактирование текста рукописи; И.А. Просвиркин — концепция и планирование работы, сбор и обработка данных, редактирование текста рукописи; И.С. Носков — сбор и обработка данных, написание текста рукописи, подготовка графических материалов для рукописи; Ю.Т. Гогоберидзе — сбор и обработка данных, написание и редактирование текста рукописи; А.В. Петрайкин — апробация фантома, сбор и обработка данных, консультативная поддержка; О.В. Омелянская — консультативная поддержка, редактирование финальной версии рукописи; Р.А. Ерижиков — вычитка финальной версии рукописи. Все авторы одобрили финальную версию перед публикацией, а также согласились нести ответственность за все аспекты работы, гарантируя надлежащее рассмотрение и решение вопросов, связанных с точностью и добросовестностью любой её части.

Благодарности. Авторы благодарят генерального директора ООО «Аваксис» Ванифатьева Артура Рустемовича за консультативную помощь в изготовлении образца рентгенологического фантома.

Этическая экспертиза. Неприменимо.

Источники финансирования. Разработку, изготовление и транспортировку экспериментального образца фантома выполняли за счёт собственных средств ООО «ФтизисБиоМед» с использованием оборудования ООО «ФтизисБиоМед». Финансирование независимой экспертной оценки изделия сотрудниками ГБУЗ «НПКЦ ДиТ ДЗМ» со стороны разработчика не проводилось.

Раскрытие интересов. Авторы Ю.Т. Гогоберидзе, И.А. Просвиркин и И.С. Носков являются сотрудниками компании ООО «ФтизисБиоМед». В.И. Классен является генеральным директором материнской компании АО «Радиокомпания "Вектор"». Остальные авторы статьи заявляют об отсутствии отношений, деятельности и интересов за последние три года, связанных с третьими лицами (коммерческими и некоммерческими), интересы которых могут быть затронуты содержанием статьи.

Оригинальность. При создании настоящей работы использованы собственные ранее опубликованные [6] изображения (график на рис. 1, эталонная цифровая рентгенограмма на рис. 2, 3D-модель на рис. 3 и сравнение рентгенограмм на рис. 6). Повторная публикация согласована с правообладателями.

Доступ к данным. Редакционная политика в отношении совместного использования данных к настоящей работе не применима.

Генеративный искусственный интеллект. При создании настоящей статьи технологии генеративного искусственного интеллекта не использовали.

Рассмотрение и рецензирование. Настоящая работа подана в журнал в инициативном порядке и рассмотрена по обычной процедуре. В рецензировании участвовали один внешний рецензент и член редакционной коллегии журнала.

ADDITIONAL INFORMATION

Author contributions: V.I. Klassen: conceptualization, writing—review & editing; I.A. Prosvirkin: conceptualization and design, data curation, formal analysis, writing—review & editing; I.S. Noskov: data curation, formal analysis, writing—review & editing, visualization; Yu.T. Gogoberidze: data curation, formal analysis, writing—original draft, writing—review & editing; A.V. Petraykin: investigation, data collection, formal analysis, supervision; O.V. Omelyanskaya: supervision, writing—review & editing; R.A. Yerizhikov: writing—review & editing. All the authors approved the version of the manuscript to be published and agreed to be accountable for all aspects of the work, ensuring that questions related to the accuracy or integrity of any part of the work are appropriately investigated and resolved.

Acknowledgments: The authors express their gratitude to the General Director of Avaksis, Artur Rustemovich Vanifatiev, for his advisory assistance in the manufacturing of the X-ray phantom sample.

Ethics approval: Not applicable.

Funding sources: The development, manufacture, and transportation of the experimental phantom prototype were carried out using the internal funds and equipment of PhthisisBioMed. Funding for an independent expert evaluation of the product by employees of the Scientific and Practical Center for Pediatric and Adolescent Health of the Moscow Department of Health was not provided by the developer.

Disclosure of interests: Yu.T. Gogoberidze, I.A. Prosvirkin and I.S. Noskov are employees of PhthisisBioMed. V.I. Klassen is the General Director of the parent company, Vector Radio Company. The authors have no relationships, activities, or interests for the last three years related to for-profit or not-for-profit third parties whose interests may be affected by the content of the article.

Statement of originality: In creating this article, the authors' previously published [6] images were used (the graph in Fig. 1, the reference digital radiograph in Fig. 2, the 3D model in Fig. 3, and the comparison of radiographs in Fig. 6). The copyright holders approved their reprinting.

Data availability statement: The editorial policy regarding data sharing does not apply to this work.

Generative AI: No generative artificial intelligence technologies were used to prepare this article.

Prevalence and peer-review: This article was submitted unsolicited and reviewed following the standard procedure. The peer-review process involved one external reviewer and two members of the Editorial Board.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ | REFERENCES

1. Vasilev YuA, Son IM, Vladzmyrskyy AV, et al. Effectiveness of imaging-based chest screening: outcomes of stage one adult health screening effort in the Russian Federation. *Public Health and Life Environment*. 2024;32(9):71–82. doi: 10.35627/2219-5238/2024-32-9-71-82 EDN: JXWAWJ
2. Vasilev YuA, Kudryavtsev ND, Mukhortova AN, et al. Operation results of radiology departments of the Moscow Health Care Department in 2016–2022. *Manager Zdravookhranenia*. 2024;(5):36–48. doi: 10.21045/1811-0185-2024-5-36-48 EDN: AOXQLD
3. Zinchenko VV, Erizhokov RA, Arzamasov KM. Method of evaluation of autonomous software based on artificial intelligence technologies for mass preventive studies. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(1):9. doi: 10.26102/2310-6018/2025.48.1.027 EDN: YLESEI
4. Gomi T, Nakajima M, Fujiwara H, Umeda T. Comparison of Chest Dual-energy Subtraction Digital Tomosynthesis Imaging and Dual-energy Subtraction Radiography to Detect Simulated Pulmonary Nodules with and without Calcifications. *Academic Radiology*. 2011;18(2):191–196. doi: 10.1016/j.acra.2010.09.021
5. Xie X, Zhao Y, Snijder RA, et al. Sensitivity and accuracy of volumetry of pulmonary nodules on low-dose 16- and 64-row multi-detector CT: an anthropomorphic phantom study. *European Radiology*. 2012;23(1):139–147. doi: 10.1007/s00330-012-2570-7
6. Klassen VI, Prosvirkin IA, Noskov IS, Gogoberidze YuT. A unique X-ray phantom produced by FTIZISBIOMED LLC. *Poliklinika*. 2024;(6-1):31–33. (In Russ.) EDN: PPyZDT

ОБ АВТОРАХ

* Гогоберидзе Юрий Тенгизович;

адрес: Россия, 422980, Чистополь, ул. Карла Маркса, д. 135;
ORCID: 0009-0001-4879-1521;
eLibrary SPIN: 5810-6961;
e-mail: gut@vector.ru

Классен Виктор Иванович, д-р техн. наук, профессор;

ORCID: 0009-0005-0157-7762;
eLibrary SPIN: 1613-6378;
e-mail: kvi@vector.ru

Провиркин Илья Александрович, канд. техн. наук;

ORCID: 0009-0008-2391-3714;
eLibrary SPIN: 3049-7017;
e-mail: pia@vector.ru

Носков Илья Сергеевич;

ORCID: 0009-0002-3790-3919;
e-mail: nis@vector.ru

Петрайкин Алексей Владимирович, д-р мед. наук, доцент;

ORCID: 0000-0003-1694-4682;
eLibrary SPIN: 6193-1656;
e-mail: PetryajkinAV@zdrav.mos.ru

Омелянская Ольга Васильевна;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;
eLibrary SPIN: 8948-6152;
e-mail: o.omelyanskaya@zdrav.mos.ru

Ерижиков Рустам Арсеньевич;

ORCID: 0009-0007-3636-2889;
eLibrary SPIN: 2274-6428;
e-mail: ErizhokovRA@zdrav.mos.ru

AUTHORS' INFO

* Yury T. Gogoberidze;

address: 135 Karl Marks st., Chistopol, Russia, 422980;
ORCID: 0009-0001-4879-1521;
eLibrary SPIN: 5810-6961;
e-mail: gut@vector.ru

Victor I. Klassen, Dr. Sci. (Engineering), Professor;

ORCID: 0009-0005-0157-7762;
eLibrary SPIN: 1613-6378;
e-mail: kvi@vector.ru

Ilya A. Prosvirkin, Cand. Sci. (Engineering);

ORCID: 0009-0008-2391-3714;
eLibrary SPIN: 3049-7017;
e-mail: pia@vector.ru

Ilya S. Noskov;

ORCID: 0009-0002-3790-3919;
e-mail: nis@vector.ru

Alexey V. Petryaikin, MD, Dr. Sci. (Medicine), Assistant Professor;

ORCID: 0000-0003-1694-4682;
eLibrary SPIN: 6193-1656;
e-mail: PetryajkinAV@zdrav.mos.ru

Olga V. Omelyanskaya;

ORCID: 0000-0002-0245-4431;
eLibrary SPIN: 8948-6152;
e-mail: o.omelyanskaya@zdrav.mos.ru

Rustam A. Erizhokov, MD;

ORCID: 0009-0007-3636-2889;
eLibrary SPIN: 2274-6428;
e-mail: ErizhokovRA@zdrav.mos.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author