

УДК 616-073.756.8

© Коллектив авторов, 2025

ПРЕИМУЩЕСТВА ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ТОМОГРАФА С ДВОЙНЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОНОВ В КОМПЬЮТЕРНОЙ ТОМОГРАФИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕГО ПРИМЕНЕНИЯ

Нагайцев М.В., Беляева Л.Е.

Государственная корпорация «Ростех», Москва, Россия

Аннотация

Современная медицина без высокоточных методов диагностики не позволяет выявлять заболевания на ранних стадиях, оценивать их динамику и контролировать эффективность лечения. Одним из наиболее информативных и технологически совершенных инструментов в арсенале врачей является компьютерная томография (далее КТ). Этот метод, основанный на рентгеновском излучении и компьютерной обработке данных, обеспечивает детализированное послойное изображение внутренних органов и тканей, что значительно расширяет диагностические возможности. Актуальность КТ обусловлена ее универсальностью, высокой скоростью сканирования и возможностью трехмерной реконструкции, что делает ее незаменимой в экстренной медицине, онкологии, неврологии, кардиологии и других областях. В отличие от традиционной рентгенографии, КТ позволяет визуализировать даже небольшие патологические изменения, что особенно важно при ранней диагностике опухолей, сосудистых нарушений и травматических повреждений. Несмотря на широкое применение, вопросы оптимизации лучевой нагрузки, дифференцированного подхода к назначению КТ и экономической целесообразности остаются предметом дискуссий. В данной статье представлен анализ современных задач, решаемых с помощью КТ, а также рассмотрены классы и параметры аппаратов КТ, их конструктивные особенности и ограничения, с которыми сталкиваются производители. Рассмотрена перспективная технология электронно-лучевого компьютерного томографа с двойными источниками электронов как инновационный метод визуализации в компьютерной томографии. Особое внимание уделяется потенциалу технологии для улучшения качества диагностики и расширения возможностей исследования. Приведены особенности конструкции и принцип работы технологии, сравнительный анализ с аппаратами КТ, а также обоснование ее уникальных возможностей в плане скорости сканирования и снижения лучевой нагрузки. В заключении приведены статистические данные, свидетельствующие о стабильном росте рынка аппаратов КТ и объема исследований в РФ.

Ключевые слова:

Компьютерная томография, электронно-лучевой компьютерный томограф с двойными источниками электронов, инновационное диагностическое устройство, скорость сканирования, доза облучения, протоколы сканирования.

ADVANTAGES OF THE ELECTRON BEAM TOMOGRAPH WITH DUAL ELECTRON SOURCES IN COMPUTED TOMOGRAPHY AND PROSPECTS OF ITS APPLICATION

Nagaytsev M.V., Belyaeva L.E.

Rostec Group of Companies, Moscow, Russia

Abstract

Modern medicine without highly accurate diagnostic methods does not allow detecting diseases at an early stage, assessing their dynamics and monitoring the effectiveness of treatment. Computed tomography (CT) is one of the most informative and technologically advanced tools in the arsenal of doctors. This method, based on X-rays and computer data processing, provides a detailed layered image of internal organs and tissues, which significantly expands diagnostic capabilities. The relevance of CT is due to its versatility, high scanning speed and the possibility of three-dimensional reconstruction, which makes it indispensable in emergency medicine, oncology, neurology, cardiology and other fields. Unlike traditional radiography, CT allows you to visualize even small pathological changes, which is especially important in the early diagnosis of tumors, vascular disorders and traumatic injuries. Despite its widespread use, the issues of optimizing radiation exposure, a differentiated approach to CT prescribing, and economic feasibility remain the subject of debate. This article presents an analysis of modern CT problems, as well as the classes and parameters of CT devices, their design features and limitations faced by manufacturers. A promising technology of electron beam computed tomography with dual electron sources is considered as an innovative imaging method in computed tomography. Special attention is paid to the potential of technology to improve the quality of diagnostics and expand research opportunities. The design features and operating principle of the technology, comparative analysis with CT machines, as well as justification of its unique capabilities in terms of scanning speed and radiation load reduction are presented. The conclusion provides statistical data indicating a steady growth in the market of CT devices and the volume of research in the Russian Federation.

Keywords:

Computed tomography, electron beam computed tomography with dual electron sources, innovative diagnostic device, scanning speed, radiation dose, scanning protocols

Введение

Компьютерная томография остаётся одним из ключевых методов неинвазивной диагностики в современной медицине. В наши дни она широко используется для решения широкого спектра задач.

Области медицины, решаемые КТ-исследованием:

- а) нейрорадиология - диагностирование артериовенозные мальформации, аневризмы, геморрагические и ишемические инсульты, опухоли головного мозга, атеросклеротические изменения, демиелинизирующие заболевания;
- б) кардиология - выявление аномалии, стенозы, аневризмы и эктазии коронарных артерий, оценка анатомии и функций сердца, выявление склероза коронарных артерий, оценка состояния миокарда после инфаркта;
- в) онкология - выявление опухолей (метастазов), оценка инвазии в прилежащие органы и ткани, определение дальнейшей тактики лечения;
- г) травматология - оценка анатомических и функциональных изменений при черепно-мозговых травмах, проведение диагностики переломов, повреждений мягких тканей и внутренних органов;
- д) пульмонология – диагностика рака легких – низкодозовая КТ (НДКТ) снижает смертность на 20-30%, диагностика фиброза и ХОБЛ показывает изменения протекания болезни, COVID-19 и пневмонии – оценивает объем поражения, ИИ-алгоритмы ускоряют анализ;
- е) в абдоминальной диагностике - метод первой линии для выявления повреждений внутренних органов после травмы, позволяет чётко визуализировать анатомические структуры брюшной полости. При исследовании органов брюшной полости, забрюшинного пространства и малого таза позволяет обнаружить объёмные образования, оценить функции органов и их общее состояние. Дифференцировать воспалительные процессы, провести первичную диагностику, исследование перед оперативным вмешательством, а также контроль состояния в динамике.

На сегодняшний день мировые производители КТ предлагают широкий спектр моделей, которые можно классифицировать на 4 класса в зависимости от функциональных возможностей:

1. Начальный класс — предназначен для стандартных диагностических исследований. Характеризуется относительно медленной скоростью сканирования, что делает его подходящим для небольших медицинских организа-

ций с умеренным потоком пациентов.

2. Средний класс — оснащен дополнительными программами сканирования, что позволяет проводить исследования быстрее и эффективнее. Такие аппараты оптимальны для клиник с высоким потоком пациентов, позволяя обеспечить баланс между производительностью и стоимостью.
3. Экспертный класс — обеспечивает высокоскоростное сканирование любых областей тела с высоким качеством изображения. Подходит для крупных медицинских центров, а также для использования в научных и исследовательских целях.
4. Премиум-класс — отличается расширенным набором программ сканирования, максимальной скоростью работы и высочайшим качеством визуализации. Такие аппараты используются в федеральных медицинских центрах, научно-исследовательских институтах и специализированных клиниках, где требуется высокий уровень диагностики.

Каждый класс оборудования подбирается в зависимости от потребностей медицинского учреждения, объёма исследований и уровня сложности задач, которые необходимо решать.

Современные КТ используют сканирование в виде спирали, при котором рентгеновская трубка вращается вокруг пациента, а стол с пациентом плавно перемещается через сканирующее кольцо.

Рентгеновский луч, проходя через тело, ослабевает пропорционально плотности тканей. Лучи, ослабленные в зависимости от плотности тканей, через которые они прошли, регистрируются детекторами.

В современных устройствах детекторы установлены в несколько рядов, где внешние ряд длиннее внутреннего. Такая конструкция позволяет многократно фиксировать данные с одного и того же участка, что повышает точность изображения и уменьшает время обследования. В популярных моделях количество поперечных срезов может варьироваться от 4 до 320 (например, в AQUILION ONE от Toshiba).

Существующие типы аппаратов для рентгеновской томографии приведены в таблице 1.

Детекторы могут быть организованы двумя способами:

- в виде дуги, которая вращается вместе с рентгеновской трубкой (3-е поколение аппаратов);
- в виде неподвижного кольца, когда только трубка совершает вращательные движения (4-е поколение аппаратов).

Традиционные модели КТ имеют конструктивные и технологические ограничения формирования рентгеновского излучения, а также систем получения и обработки данных, к примеру: необходимость высоких доз облучения и длительное время сканирования, недостаточная скорость для сканирования подвижных органов (сердца, лёгких) без применения дополнительных устройств синхронизации и медикаментов для замедления движения органа. Для преодоления этих огра-

ничений развивается технология электронно-лучевой компьютерного томографа с двойными источниками электронов (ЭЛКТДИ).

Особенности конструкции ЭЛКТДИ

Технология Электронно лучевого томографа впервые была применена компанией Imatron Inc. в томографе Иматрон С-100 в конце 1983 года, и стала революционным шагом в области медицинской визуализации благодаря своей способности выполнять сверхбыстрые сканирования (Рис. 1).

Таблица 1

Характеристика участников пилотного проекта

Параметры	Мультиспиральный (Многосрезовой) КТ (МСКТ)	Конусно-лучевые (КЛКТ)	Электронно-лучевой томограф с двойным источником электронов (ЭЛКТДИ)
Характеристика	Спиральная КТ с узко коллимированным пучком и многорядным расположением детекторов от 4 до 320 срезов за один оборот РТ. Из тонких срезов формируется объёмная реконструкция.	Используется конусообразный пучок рентгеновских лучей и плоский детектор. Объёмная реконструкция математически раскладывается на тонкие срезы	Используется конусообразный пучок рентгеновских лучей и многорядное кольцо (дуга) детекторов. Объёмная реконструкция математически раскладывается на тонкие срезы
Применение	Любые современные исследования в рентгеновской томографии	Области применения: стоматология, челюстно-лицевая хирургия, оториноларингология	Любые современные исследования в рентгеновской томографии
Преимущество	Сокращается время исследования, высокое качество изображения и детализации	Компактные размеры; низкая лучевая нагрузка; разрешён для установки в жилом фонде.	Низкая лучевая нагрузка; высокая скорость сканирования; получение объёмного изображения без искажения.
Недостатки	Относительно (КЛКТ и ЭЛКТДИ) высокая лучевая нагрузка	Узкоспециализирован	Недостатки новой технологии КТ (оригинальные детекторы, источники электронов)
Скорость сканирования	300 мс	30 с	30 мс
Качество изображения	Высокое пространственное и временное разрешение	Высокое пространственное и временное разрешение	Высокое пространственное и временное разрешение
Лучевая нагрузка	В среднем 1,5 - 20 мЗв	До 2 мЗв	До 1 – 5 мЗв (в зависимости от покрытия по Z)

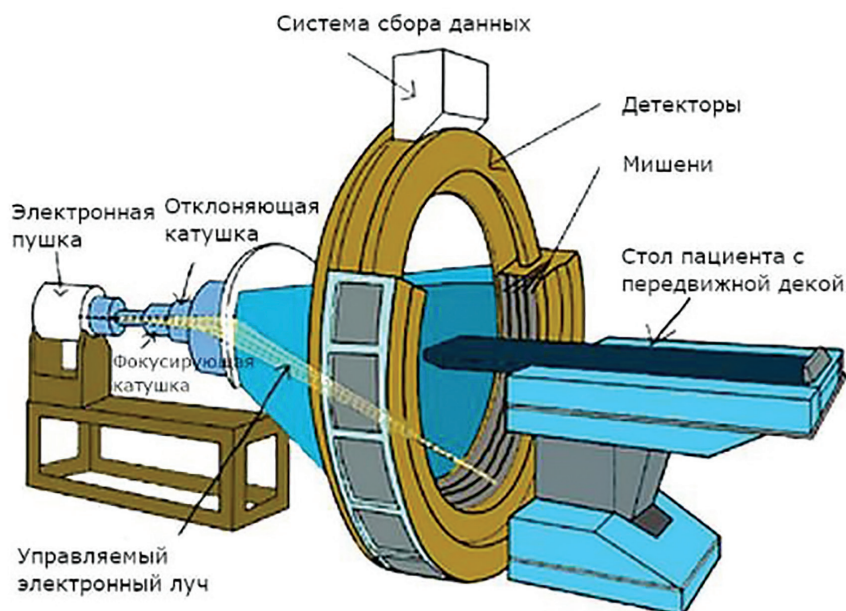


Рис. 1. Иматрон C-100 Imatron Inc

Вращающаяся рентгеновская трубка, применяемая в обычных аппаратах КТ, была заменена электронно-лучевой, где луч генерировался внутри стационарной трубки и направлялся на неподвижные мишени, расположенные по окружности вокруг пациента. Благодаря отсутствию движущихся частей, Иматрон мог выполнять сканирование за миллисекунды, и был рассчитан, в основном, для исследования быстро движущихся органов, таких как сердце. В силу конструкции и технологии Иматрон имел узкую специализацию и был ограничен в других областях медицины, где требуется более детальное изображение мягких тканей (например, онкология или неврология). Также имелись ограничения по размещению пациента, конструктивно было ограничение на подачу стола через гантри. Для получения качественного изображения могла требоваться повышенная доза облучения и т.д. Несмотря на свои недостатки, Иматрон остался важным этапом в развитии компьютерной томографии.

Электронно-лучевой томограф с двойным источником электронов (рисунок 2) представляет собой инновационное диагностическое устройство, которое объединяет технологии электронно-лучевого сканирования с использованием двух независимых источников рентгеновского излучения. Это позволяет значительно улучшить характеристики диагностики, такие как скорость сканирования и снижение дозы облучения. Рассмотрим основные особенности и преимущества такой системы (рисунок 3).

Принцип работы: вместо одной электронно-лучевой пушки используется пара электронно-лучевых пушек, каждая из которых генерирует собственный поток электронов. Эти потоки направляются на две отдельные мишени (аноды), где происходит преобразование энергии электронов в рентгеновское излучение.

Обе пушки работают синхронно или асинхронно, в зависимости от типа исследования: синхронный режим используется для увеличения мощности излучения и повышения скорости сканирования, асинхронный режим позволяет одновременно получать данные с разных углов обзора, что особенно полезно при исследовании движущихся объектов, например, сердца или сосудов. Это снижает артефакты от движения и улучшает качество изображений.

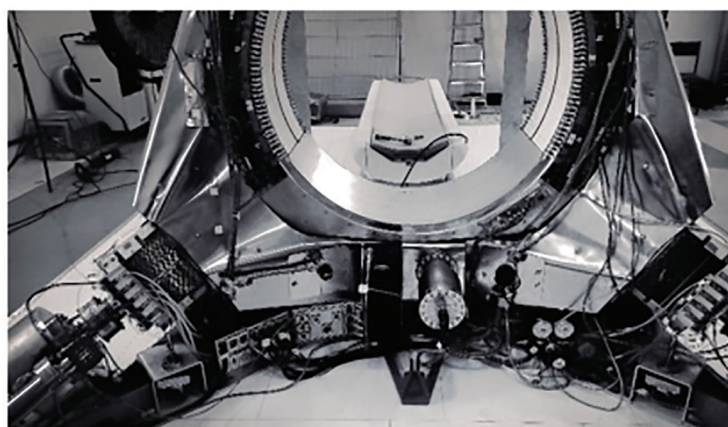
Электромагнитные системы управления лучами. Отдельные системы управления для каждого электронного луча позволяют точно регулировать его направление, фокусировку и энергию.

Система детекторов. Детекторы расположены по периферии кольца сканера и регистрируют проходящее через тело пациента рентгеновское излучение от обоих источников. Система детекторов сбора данных обеспечивает покрытие по оси Z с разрешением, сопоставимым с существующими компьютерными томографами премиального и среднего сегмента.

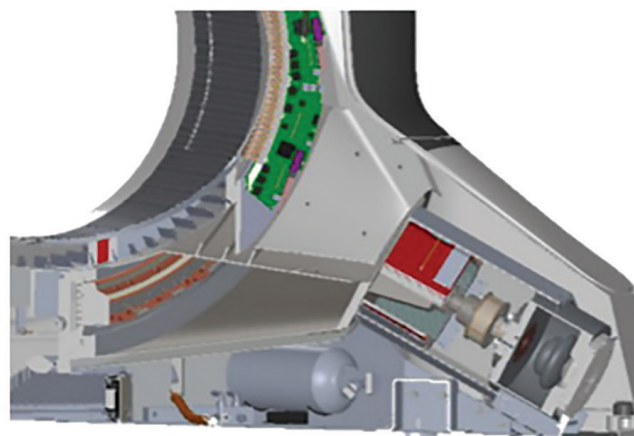
Два источника могут работать одновременно или попеременно, генерируя излучение с разными уровнями энергии (например, низкая и высокая



Рис. 2. Общий вид рабочего прототипа ЭЛКТ



а



б

Рис. 3. Вакуумная камера генератора электронного излучения, внутри которой размещается система мишеней: а- общий вид рабочего прототипа без кожуха; б- электронная модель фрагмента ЭЛКТДИ с лучевой пушкой, электромагнитной системой управления лучом, мишенями и кольцом детекторов

энергия). Это позволяет приблизиться к принципам двухэнергетической визуализации, даже при использовании однослойного детектора. Возможность раздельного анализа ослабления излучения на двух энергетических уровнях помогает улучшить дифференциацию материалов, таких как кальций, йодсодержащие контрастные вещества и мягкие ткани.

Компьютерная система обработки данных.

Специализированное программное обеспечение используется для реконструкции изображений на основе данных, полученных с системы

детекторов. Рентгеновская томография, способна без геометрических искажений, с высокой степенью точности в интерактивном режиме произвести необходимые измерения патологических очагов или анатомических особенностей структур организма. Достижимая точность соизмерима с точностью традиционных средств контактного измерения благодаря математическим алгоритмам реконструкции для томографической визуализации. Для реконструкции томографических изображений используется алгоритм фильтрованной обратной проекции, так как такой способ ре-

конструкции обеспечивает лучшее разрешение, чем метод интерполяции. Дальнейшее развитие предполагает переход к более эффективному (хотя и более затратному) методу итеративной реконструкции. Алгоритмы итерационной реконструкции позволяют минимизировать шум и улучшить качество изображений. При итеративной реконструкции алгоритм обновления изучается на основе обучающих данных с использованием методов машинного обучения с сохранением модели формирования изображения, что позволяет получать быстрые и качественные реконструкции.

Преимущества ЭАКТДИ перед современными аппаратами КТ

Высокое пространственное разрешение. Одним из главных преимуществ ЭАКТДИ является возможность достижения высокого пространственного разрешения. Благодаря использованию двух источников электронов с различными углами проекции и энергиями, технология способна выявлять структуры размером менее 0,05 мм. Это особенно важно при диагностике онкопатологий.

Скорость сканирования. ЭАКТДИ обеспечивает существенное сокращение времени сканирования (в 10 раз) благодаря одновременному сбору данных с двух источников электронов. Это становится критически важным при исследовании сердца.

Минимизация дозы облучения. Благодаря эффективному использованию электронных пучков и возможности работы с меньшей интенсивностью излучения, ЭАКТДИ позволяет снизить дозу облучения пациента и обеспечить безопасное использование в педиатрии. Пример: в педиатрической диагностике использование ЭАКТДИ может снизить дозу облучения на 60–70% по сравнению с современными КТ-сканерами.

Улучшение контрастности. ЭАКТДИ обеспечивает лучшую контрастность изображений благодаря учёту энергий электронов. Это позволяет различать материалы с близкими плотностями. Физико-химический анализ с применением двух энергетической КТ, дало возможность чётко увидеть различный состав, так как сканирование проводится с помощью двух лучевых пучков – низкой и высокой энергии. Стандартная одноэнергетическая рентгеновская установка имеет ограничения в дифференциации тканей и материалов различной плотности и химического состава, так как коэффициент ослабления рентгеновского излучения не является уникальным для каждого вещества. Это приводит к тому, что на снимках материалы с разными свойствами, такие

как кальций и йодсодержащие контрастные вещества, могут визуализироваться с одинаковыми значениями пикселей. Такая особенность затрудняет диагностику ряда заболеваний, особенно в случаях, когда требуется точное различие между тканями или контрастными агентами. Пример: В урологии качественная и количественная оценка конкрементов почек, позволяет применить наиболее эффективную тактику лечения.

Расширенные возможности постобработки могут быть использованы для реконструкции изображений с различными параметрами, такими как виртуальное монохроматическое изображение, карты плотности или карты концентрации контрастного вещества. Это повышает диагностическую ценность исследования.

Потенциальные новые протоколы сканирования

Гибкость в настройке параметров сканирования каждого источника (напряжение и ток) и высокая скорость позволяет адаптировать исследование под конкретные клинические задачи. Использование новых возможностей:

- 1) Формирование протокола для кардиологического исследования. Диагностическая визуализация сердца без динамических артефактов и визуализация полного сердечного цикла, при снижении дозы облучения.
- 2) Формирование протокола для онкологической диагностики. Получение клинически значимой информации на раннем этапе формирования первичного очага патологии и повышение чувствительности и специфичности диагностики, снижение количества ложноположительных результатов.
- 3) Формирование педиатрических протоколов. Диагностика педиатрических пациентов с минимальной дозой облучения и вероятностное снижение риска эффектов облучения (детерминированные, стохастические, соматические, генетические) без потери высокого качества изображений.

Расширение областей применения

- 1) Промышленный контроль:
 - Авиационная промышленность: Контроль качества сложных конструкций, таких как турбины и двигательные установки.
 - Автомобильная промышленность: Анализ деталей двигателей и систем безопасности.
 - Электроника: Исследование внутренней структуры микросхем и печатных плат.

- 2) Научные исследования:
- Материаловедение: Изучение микроструктуры различных материалов, включая композиты.

Проблемы разработки и пути их решения

Высокая стоимость оборудования.

Решение: Разработка более доступных технологий производства источников электронов и детекторов. Серийное производство позволит снизить стоимость оборудования.

Сложность алгоритмов реконструкции. Решение: Использование методов машинного обучения для автоматизации обработки данных. Развитие машинного обучения позволит создавать более эффективные алгоритмы реконструкции.

Необходимость в новых детекторах. Решение: Разработка чувствительных детекторов, способных различать как электроны теряют энергию при прохождении через объект исследования. Новые материалы и технологии могут повысить чувствительность детекторов.

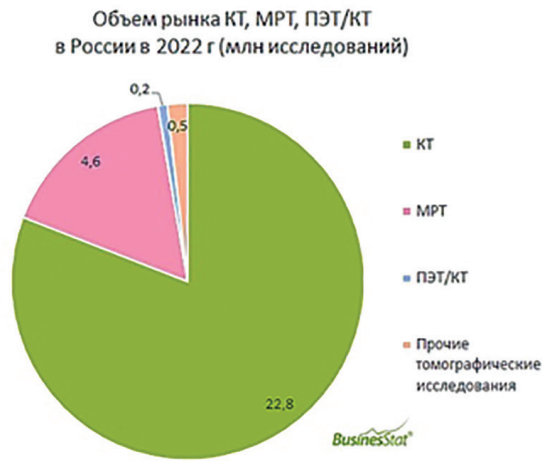
Заключение

Во всём мире наблюдается устоявшийся тренд развития современной медицины на широкое внедрение в медицинскую практику неинвазивных методов диагностики, нашедших свое отражение как в государственных программах здравоохранения (например, Государственная программа Российской Федерации «Развитие здравоохранения»), так и в росте спроса со стороны частных

клиник на диагностическое оборудование. Компьютерные томографы стали неотъемлемой частью современной медицинской диагностики: за 10 лет доля КТ-исследований выросла с 1,8% до 12% на рынке визуальной диагностики (сравнение с аппаратами: рентген, КТ, МРТ).

По данным «Анализа рынка томографической диагностики в России», подготовленного BusinesStat в 2023 г, в 2022 г в России было проведено 28,1 млн томографических исследований – на 87,3% больше, чем в 2018 г. Активному росту рынка томографии способствовала господдержка отрасли: закупка оборудования для государственных медучреждений в рамках нацпроекта «Здравоохранение», выделение в программе госгарантий бесплатного оказания медицинской помощи нормативов и тарифов на томографические исследования, сокращение максимально-допустимых сроков ожидания КТ и МРТ-исследований.

Электронно-лучевой компьютерный томограф с двойными источниками электронов (ЭЛКТИ) представляет собой революционную технологию в области компьютерной томографии. Его уникальные преимущества, такие как высокое разрешение, скорость сканирования, минимальная доза облучения и точность реконструкции, делают его особенно ценным для медицинской диагностики, для промышленного контроля и научных исследований. Расширение областей применения открывают широкие возможности для дальнейшего развития технологии.



а

Динамика количества исследований за 10 лет: 2010-2021

+15%

фактического количества всех исследований (рентген, КТ, МРТ)

+785%

фактического количества исследований КТ

Рентген	160 498 269	173 608 079	164 113 906
КТ	2 982 304	8 109 110	22 618 346
МРТ	1 236 940	2 352 562	2 811 258
	2010 г.	2015 г.	2021 г.

б

Рис. 4. а) данные «Анализа рынка томографической диагностики в России», подготовленного BusinesStat в 2023 г.; б) изменение доли КТ-исследований 2010-2021гг.

Новая линейка ЭАКТДИ, разработанных на единой платформе, предлагает универсальное решение для медицинских учреждений. Она позволяет заменить КТ аппараты как среднего, так и бюджетного класса, обеспечивая высокое качество диагностики при снижении эксплуатационных затрат. Благодаря модульной архитектуре платформы ЭАКТДИ возможно создание инновационных КТ-аппаратов различного назначения, охватывающих все сегменты медицинской диагностики – от рутинных исследований до специализированных обследований.

Будущее ЭАКТДИ видится многообещающим и дальнейшие исследования в этой области могут привести к созданию инновационных решений в практике визуализации.

Литература

1. Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии. Учебное пособие. – СПб: СПб-ГУ ИТМО, 2006. – 132 с. П.1.1 стр.10
2. Прокоп, Матиас. "Михазль Галански." Спиральная многослойная компьютерная томография. 2-е издание.
3. Перевод с английского. Москва. «МЕДпресс-информ 2 (2009). Хофер, Матиас. "Компьютерная томография." Базовое руководство 2 (2008).
4. Шевченко Ю.Л. «Сердечно-сосудистая хирургия – показатель развития медицинской науки и здравоохранения в стране: основные тенденции развития» Корпоративное здоровье и промышленная медицина ТОМ 1, №1, 2024
5. Smith J., Johnson R. "Advances in Electron Beam Tomography." Journal of Radiological Imaging, 2022.
6. Petrov A., Ivanov S. "Dual-Electron Source Technology in Medical Imaging." RT Medicine, 2021.
7. Chen L., Wang X. "Applications of Electron Beam Tomography in Material Science." Advanced Materials Research, 2023.
8. Kuznetsov V.N. "Mathematical Modeling of Dual-Source Electron Beam Tomography." Computational Imaging, 2022.
9. Brown M., Davis T. "Radiation Dose Optimization in Medical Imaging." Radiation Safety Journal, 2021.
10. Johnson P., Lee H. "Curved Reconstruction Methods in CT Imaging." IEEE Transactions on Medical Imaging, 2023.

Контакты авторов:

Нагайцев М.В.

e-mail: M.V.Nagaytsev@rostec.ru

Конфликт интересов: отсутствует