

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ ФИЗИКИ
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ»

Объект авторского права

УДК 53.088.6

ЕМЕЛЬЯНЕНКО
Евгений Владимирович

**МЕТОД И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПЭТ ИЗОБРАЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ
ОБЪЕКТОВ И ИХ МОДЕЛЕЙ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля
природной среды, веществ, материалов и изделий

Минск 2023

Научная работа выполнена в Учреждении образования «Международный государственный экологический институт им. А.Д. Сахарова» Белорусского государственного университета (МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ)

Научный руководитель:

Тарутин Игорь Германович,
доктор технических наук, профессор, медицинский физик Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова

Официальные
оппоненты:

Холмецкий Александр Леонидович,
доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры ядерной физики Белорусского государственного университета

Кожемякин Валерий Александрович,
кандидат технических наук, директор научно-производственного унитарного предприятия «АТОМ-ТЕХ»

Оппонирующая
организация:

Полоцкий государственный университет им. Ефросиньи Полоцкой

Защита состоится 10 ноября 2023 г. в 14:00 на заседании совета по защите диссертаций Д 01.16.01 при ИПФ НАН Беларуси по адресу: 220072, г. Минск, ул. Академическая, 16. Адрес электронной почты: admcom@iaph.bas-net.by. Телефон ученого секретаря совета: +375 (17) 360-23-00.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПФ НАН Беларуси.

Автореферат разослан «__» октября 2023 г.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
Д 01.16.01, кандидат технических наук



М. В. Асадчая

ВВЕДЕНИЕ

Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ), совмещенная с компьютерной рентгеновской томографией, является новым и перспективным направлением диагностики онкологических, кардиологических и нейродегенеративных заболеваний. Особая ценность данного метода и сопутствующей ему технической аппаратуры состоит как в выявлении информации, доступной для быстрой визуальной оценки, так и в получении соответствующего набора результатов количественных измерений, к которым относятся: объем исследуемого биологического объекта, накапливающего радиоактивное индикаторное вещество (радиофармацевтический препарат – РФП) объемная активность (кБк/мл) индикаторного вещества в исследуемом биологическом объекте (SUV). Объемная активность индикаторного вещества, накапливающаяся в биологических объектах (патологических очагах) и измеренная на изображениях первичного исследования (до начала специального лечения), в процессе лечения и после его завершения, является важным показателем динамики (отрицательной или положительной) протекания патологического процесса и подвержена влиянию не только пространственного разрешения, негативно влияющего на точность ее восстановления, но параметров реконструкции диагностических ПЭТ изображений.

На основании полученных результатов количественных измерений осуществляется оценка характера патологического процесса, отклика на терапевтические процедуры, а также динамики развития патологического процесса.

Точность количественной информации и качество изображения (выраженное в таких величинах как шум, контрастность, соотношение сигнал/шум-SNR) в значительной степени зависят от параметров сканирования (алгоритм реконструкции, входные параметры алгоритма, фильтры, длительность сбора данных) и детектирующей системы. Установление зависимостей между выше названными характеристиками качества изображения и параметрами сканирования позволит достичь оптимального уровня информативности ПЭТ изображения и выявления тенденций изменения характеристик информативности в зависимости от параметров сканирования.

В свою очередь установление характера влияния параметров сканирования на точность измерения объемной активности, восстановленной при реконструкции ПЭТ изображения, позволит повысить точность количественных характеристик изображения. А также снизить погрешность измерения удельной активности на изображениях, полученных при сканировании биологического объекта на томографах с различными детектирующими системами.

До недавнего времени ПЭТ-КТ использовалась как диагностическая процедура. Использование ПЭТ-КТ изображений для оконтурирования биологических объектов в лучевой терапии может помочь для редуцирования дозы для органов риска, однако для продуктивного использования ПЭТ изображений необходимо решение задач, направленных на подавление артефактов и краевых эффектов, возникающих из-за дыхательных движений биологического объекта, сравнительно (с КТ и МРТ) низких пространственного разрешения и соотношения сигнал/шум.

В этой связи исследования, направленные на выявление зависимостей между параметрами сканирования и количественными характеристиками информативности,

а также оконтуриваемыми объемами для дальнейшего использования ПЭТ изображений в лучевой терапии, представляют собой актуальные научно-практические задачи, имеющие важное значение для увеличения количества диагностической информации, снижения радиационной нагрузки на биологические объекты.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнялась в рамках проекта международной технической помощи МАГАТЭ «Улучшение гарантии качества в позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией ВУЕ 6012» (2019–2021 гг.).

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научной, научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг. (утверждены Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156): п. 2 «Биологические, медицинские, фармацевтические и химические технологии производства: диагностика, медицинская профилактика и лечение инфекционных, включая вирусной этиологии, и неинфекционных заболеваний, экспертиза качества медицинской помощи; медицинское оборудование», п. 4 «Машиностроение, машиностроительные технологии, приборостроение и инновационные материалы», подпункт «радиоэлектронные системы и технологии, приборостроение».

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Целью диссертационной работы является разработка методов и технических средств контроля при определении основных характеристик диагностических ПЭТ изображений областей накопления радиоактивного индикаторного вещества при диагностике очагов накопления радиофармацевтического препарата и их оконтуривания с учетом алгоритма реконструкции и положения исследуемого объекта.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

- установить факторы, влияющие на характеристики ПЭТ изображения, включая длительность сбора данных детектирующей системой, а также выбор алгоритма реконструкции изображения, и выявить зависимости количественной оценки информативности изображения от параметров сканирования;
- разработать методики, позволяющие минимизировать разницу количественных значений индикаторного вещества в модели биологического объекта при его сканировании на томографах с разными детектирующими системами;
- разработать установку, позволяющую оценивать отклонение качественных и количественных характеристик на динамических изображениях исследуемых объектов при ПЭТ сканировании и оценивать погрешности определения объемов моделей биологических объектов при их оконтуривании.

Объектом исследования являются диагностические ПЭТ изображения живых объектов и их моделей-фантомов с патологическими очагами-опухолями.

Предметом исследования являются зависимости между качественными (контраст, шум, соотношение сигнал/шум), количественными (метаболический объем-область накопления радиофармацевтического препарата, объемная активность радиофармацевтического препарата в патологическом очаге накопления-опухоли) характеристиками ПЭТ изображений и параметрами их обработки.

Научная новизна

1. Впервые установлены зависимости между реконструкционными параметрами ПЭТ изображений с учетом использования времяпролетной технологии (TOF) и характеристиками качества изображения, позволяющие оценивать изменение шума, контраста, соотношения сигнал/шум при использовании различных входных параметров сканирования биологических объектов и их моделей, а именно использование TOF совместно с PSF функцией позволяет увеличить значение контраста на 20 %.

2. Впервые выполнены исследования, направленные на повышение определения точностных характеристик индикаторного вещества в областях накопления биологического объекта или модели, где девиация вызвана эффектами, происходящими в преобразователях-детекторах, что позволило выявить ключевые факторы влияния со стороны программно-аппаратного комплекса на точность восстановления удельной активности на ПЭТ изображениях и выявить преимущества использования времяпролетной технологии, а также дополнительных фильтров.

3. Предложена методика коррекции параметров сканирования на основе коэффициента восстановления объемной активности моделей очагов при сканировании биологических объектов и их моделей на томографах с различными детектирующими системами, основанная на использовании программных средств идентификации исследуемого объекта и позволяющая уменьшить ошибку расчета объемной активности на ПЭТ изображениях.

4. Впервые разработан метод расчета точности определения объемов и коэффициентов восстановления объемной активности моделей биологических объектов, изменяющих пространственное положение с использованием впервые разработанной установки, отличительными признаками которой является возможность имитации дыхательных движений и смещения при этом сразу шести областей. В результате установлена разница между коэффициентами восстановления объемной активности в биологических моделях, составляющая 11,4 %, 20,3 %, 50,38 %, 70,9 %, 85,35 % для моделей диаметрами 37 мм, 28 мм, 22 мм, 17 мм, 13 мм, 10 мм соответственно, а также разница объемов при совмещении КТ и ПЭТ изображений в статическом и динамическом (в движении) состояниях.

Положения, выносимые на защиту

1. Установленные зависимости между количественными, качественными характеристиками ПЭТ изображения и параметрами алгоритмов реконструкции, с учетом влияния аксиальных фильтров, размерности матрицы, позволяющие оценивать изменения значений шума, контраста, соотношения сигнал шум, при изменении входных параметров, а именно количества итераций, количества подмножеств, размерности фильтра Гаусса.

2. Установленные зависимости между входными параметрами реконструкции итерационных алгоритмов ПЭТ изображений и коэффициентами восстановления объемной активности (RC) радиофармацевтического препарата, а именно изменение фактора β на 50 отн. ед. увеличивает RC до $8,2 \pm 3,0$ %, при изменении числа итераций с шагом 1, увеличение RC составляет до $20 \pm 4,0$ %.

3. Методика коррекции параметров сканирования на томографах с различными детектирующими системами на основе использования коэффициента восстановления объемной активности радиоактивного индикаторного вещества и методика его коррекции с использованием средств программного обеспечения, позволяющая достичь разницы коэффициентов восстановления после коррекции параметров сканирования на двух томографах: 47,57 %, 6,7 %, 9,28 %, 13,93 %, 11,43 %, 11,58 % для сфер диаметрами 37 мм, 28 мм, 22 мм, 17 мм, 13 мм, 10 мм соответственно.

4. Экспериментально установленные зависимости между коэффициентами восстановления объемной активности и размерами биологических моделей при их движении с учетом использования различных реконструкционных алгоритмов, а также выявлены неопределенности вычисления объемов по ПЭТ изображениям при оконтуривании движущихся моделей биологических объектов, где движение моделируется впервые разработанной установкой, с использованием которой также были установлены разницы номинального объема модели и объема оконтуривания в динамическом положении

Личный вклад соискателя

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Определение цели и задач исследований, интерпретация и обобщение научных результатов проводились совместно с научным руководителем: доктором технических наук, профессором. И. Г. Тарутиным.

Рассчитаны значения коэффициентов восстановления удельной активности сфер (моделей патологических очагов накопления РФП) по ПЭТ изображениям, полученным автором в результате сканирования с различными параметрами модели-фантома участка биологического объекта. Дана оценка влияния параметрам сканирования на точность определения удельной активности сфер с учетом алгоритма реконструкции. Предложен метод настройки томографов с различными детектирующими системами, позволяющий повысить точность сравнительной оценки удельной активности, измеренной в очагах накопления РФП биологического объекта, основываясь на значениях коэффициентов восстановления моделей-сфер. Определены параметры сканирования биологических объектов, позволяющие повысить информативность диагностических ПЭТ изображений.

Патент на способ оценки качества изображения позитронно-эмиссионного томографа при сканировании движущейся биологической модели получен совместно с М. Н. Петкевичем и П. А. Белобоковым.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: Всероссийский научно-образовательный конгресс с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» (Москва 2019); конференция «Современные проблемы радиационной и экологической медицины, лучевой диагностики и терапии» (Гродно 2020); 20-я Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI-го века» (Минск 2020), 18-я Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI-го века» (Минск 2018); конференция «Современные аспекты медицинской физики и радиационной онкологии» (Минск 2019); Всероссийский научно-

образовательный конгресс с международным участием «Онкорadiология, лучевая диагностика и терапия» (Москва 2022), 23-я Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI-го века» (Минск 2023).

Результаты диссертационной работы апробированы:

– при проведении контроля качества позитронно-эмиссионных томографов на базе РНПЦ ОМР, лекционных курсов и практических занятий на базе МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ;

– при проведении процедур контроля качества ПЭТ/КТ-исследований, разработанных по заданию МАГАТЭ в рамках проекта международной технической помощи ВУЕ 6012 (2019–2021);

– при проведении процедур контроля качества предлучевой подготовки в рамках проекта международной технической помощи МАГАТЭ «Совершенствование передовых методов лучевой терапии включая гарантии качества и контроль качества» (ВУЕ6013)29 (2020–2022 г.).

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 27 печатных работах. 6 статей изданы в журналах, рекомендованных ВАК (всего 2,52 а. л.), 12 статей в сборниках и материалах конференций (всего 2,15 а. л.), 8 тезисов докладов (всего 0,49 а. л.). Получен патент РБ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения, библиографического списка и трех приложений. Полный объем диссертации 154 страницы. Таблицы и рисунки занимают объем 38 страниц (78 иллюстраций, 16 таблиц). Библиографический список содержит 97 наименований, включая 27 публикаций соискателя.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во введении и общей характеристике работы определена область исследования диссертационной работы, обоснована актуальность темы, цели и задачи исследования, отмечена научная и практическая значимость работы, определены положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены общие принципы позитронно-эмиссионной томографии, использующиеся радиофармацевтические препараты (РФП или радиоактивные индикаторные вещества) в Республике Беларусь, а также особенности технологического процесса проведения сканирования на ПЭТ/КТ томографе (позитронно-эмиссионный томограф, совмещенный с компьютерным рентгеновским томографом). На рисунке 1 представлена схема технологического процесса (где под РФП понимается радиофармацевтический препарат или радиоактивное индикаторное вещество, а КТ – компьютерный рентгеновский томограф). Важно отметить, что ПЭТ/КТ это интегрированная система, т. е. сканер состоит из компьютерного томографа и позитронно-эмиссионного томографа, интегрированных в одном корпусе. В результате, получают несколько серий ПЭТ и КТ изображений, которые можно просматривать как по отдельности, так и совмещая их, получая гибридные или совмещенные (fusion) изображения. В основе ПЭТ лежит принцип регистрации двух эмиссионных гамма квантов (детектирующей системой томографа), полученных в результате взаимодействия позитрона, испущенного нейтрон-дефицитным ядром и электрона.



Рисунок 1 – Схема технологического процесса ПЭТ/КТ диагностики, включающая основные этапы получения диагностического изображения биологического объекта

Изображения биологических объектов и моделей, использованные в диссертационной работе, получены на 2-х позитронно-эмиссионных томографах, совмещенных с компьютерным томографом (Discovery IQ и Discovery 710), с различными детектирующими системами (на основе кристаллов BGO – германата висмута и LYSO – ортосиликата лютеция иттрия), что в свою очередь позволило оценить влияние

детектирующей системы на качество диагностической информации и на различие количественных характеристик получаемых изображений (точность восстановления удельной активности радиоактивного индикаторного вещества).

Построение изображений и последующая их обработка выполняются с помощью программного обеспечения (разработанного производителем – General Electric), включающего различные алгоритмы (VPHD, QClear) и фильтры обработки изображений (фильтр Гаусса, аксиальные фильтры), которые влияют на качественные (шум, контраст, соотношение сигнал/шум) и количественные (объемная активность радиофармацевтического препарата в опухоли – SUV, метаболический объем) характеристики ПЭТ изображения.

Описываются особенности влияния программного обеспечения, в частности реконструкционных алгоритмов, на качество ПЭТ изображения и количественные показатели. Также проанализирована проблематика точности восстановления активности радиофармацевтического препарата (эффект частичного объема), являющегося следствием низкого пространственного разрешения. Рассмотрены особенности использования ПЭТ изображений при планировании лучевой терапии и проблематика совмещения модальностей (изображений) ПЭТ/КТ.

Вторая глава посвящена оценке неопределенностей при восстановлении на ПЭТ изображении активности радиофармацевтического препарата (эффекта частичного объема).

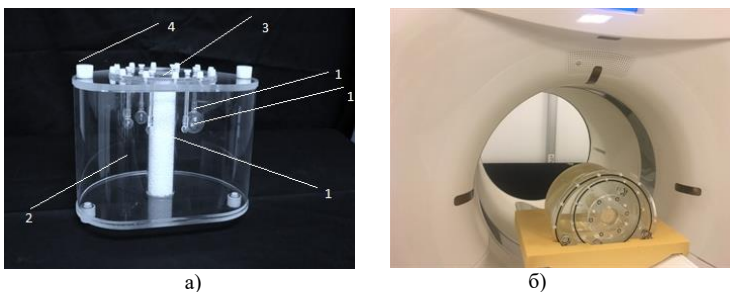
При измерении активности (кБк/мл) определенного объема ткани фактическое измерение включает смежные ткани, ложно влияющие (обычно уменьшающиеся) на расчет объемной активности (или SUV – стандартизированный показатель накопления радиофармацевтического препарата). Этот эффект является результатом низкого разрешения ПЭТ-сканирования и зависит от параметров изображения томографа, размера и морфологии оцениваемого объекта и распределения индикаторного вещества (РФП- ^{18}F -фтордизоксиглюкоза) в теле. Эффект частичного объема возникает почти для всех повреждений диаметром менее 3,0 см. Чем меньше поражение, тем значительнее эффект частичного объема. Эффекты настолько значительны для небольших поражений, что поражения менее 8,0 мм следует рассматривать как «ниже разрешения ПЭТ».

Эффект частичного объема является показательным фактором пространственного разрешения позитронно-эмиссионного томографа. Оценка коэффициента восстановления позволяет выявлять и учитывать влияние параметров реконструкции получаемого на ПЭТ изображения на точность восстановления активности с учетом размеров очага накопления радиоактивного индикаторного вещества. В ряде рассматриваемых зарубежных публикаций коэффициенты восстановления рассматриваются непосредственно как индикаторы эффекта частичного объема. Однако в них не учитываются влияющие на него факторы, такие как параметры реконструкции, включающие различные итерационные алгоритмы и их параметры (количество итераций – количество циклов расчета алгоритмом), подмножества (свободные проекции), аксиальные фильтры (фильтры, позволяющие оптимизировать качество аксиальных проекций диагностических ПЭТ изображений и др.).

В главе представлены результаты оценки влияния различных параметров сканирования моделей биологического объекта на коэффициент восстановления объемной активности и некоторые качественные характеристики ПЭТ изображения.

Помимо влияния размера потенциального патологического очага на коэффициент восстановления в данной работе исследовано влияние параметров реконструкции (алгоритм реконструкции и его параметры, размерность матрицы, аксиальные фильтры) времяпролетная технология, соотношение активности в очаге и окружающих тканях, на формирование коэффициентов восстановления.

Исследование выполнено на позитронно-эмиссионных томографах Discovery IQ и Discovery 710, производства General Electric. В качестве вспомогательного оборудования использовались: система автоматического дозирования радиофармацевтического препарата KARL 100 (с калибратором активности ISOMED), модель биологического объекта фантом-ИЕС производства Biodex (рисунок 2 а, б).



1 – сферы, установленные в крышку; 2 – корпус фантома; 3 крышка с установленными сферами на штифтах; 4 – отверстие для заполнения фантома; 5 – пример позиционирования фантома ИЕС на столе позитронно-эмиссионного томографа
Рисунок 2 – Модель-фантом, имитирующая объемную область биологического объекта с патологическими очагами

Биологическая модель-фантом ИЕС состоит из емкости, наполняемой индикаторным веществом и шести сфер различного диаметра, имитирующих патологические очаги накопления индикаторного вещества. Т. е., используя фантом ИЕС, был смоделирован участок человеческого тела с патологическими очагами накопления (опухолями) индикаторного вещества. Радиофармацевтический препарат – ^{18}F -ФДГ.

Обработка полученных изображений выполнялась на программном обеспечении рабочей станции «Volume share». Разница между коэффициентами восстановления для каждой из сфер при изменении параметров реконструкции рассчитывалась по формуле:

$$RC_{\text{отн}} = \left| 1 - \frac{RC_i}{RC_{i+1}} \right|, \quad (1)$$

где RC_i – значение коэффициента восстановления объемной активности до воздействия (изменения) реконструкционного параметра;

RC_{i+1} – значение коэффициента восстановления объемной активности после воздействия (изменения) реконструкционного параметра.

Таким образом, оценивается значение понижение/повышения коэффициента восстановления.

Среднее значение девиации коэффициента восстановления объемной активности при изменении параметров реконструкции определялось как:

$$\langle RC \rangle_{\text{отн}} = \frac{\sum_1^n RC_{\text{отн}}}{n} \times 100\% , \quad (2)$$

где n – количество экспериментов.

Для обработки изображений использовался оператор-независимый метод, который позволяет исключить ошибку со стороны специалиста, а также избежать неопределенностей, связанных с неоднородностью распределения радиоактивного индикаторного вещества внутри модели-фантома. Вычислены средние значения коэффициентов восстановления, составляющие 0,63 отн. ед. и 0,54 отн. ед. для оператор-зависимого и оператор-независимого методов соответственно.

Выполнен статистический анализ данных (влияние PSF функции при сканировании на каждом из томографов, времяпролетной технологии – TOF, алгоритма QClear ($\beta=350$)). Результаты статистического анализа данных представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов восстановления, полученные в результате реконструкции ПЭТ изображений с различными входными параметрами

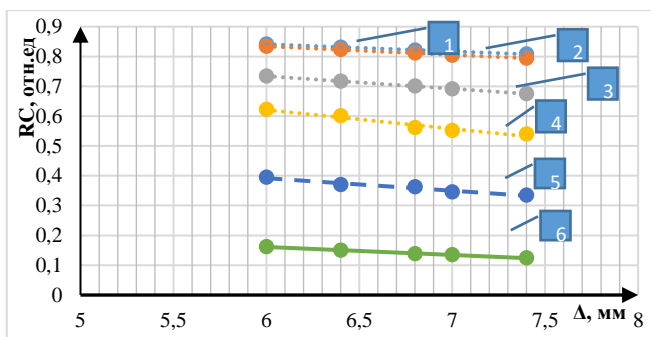
Метод реконструкции изображений	Модель томографа	Среднее значение коэффициента восстановления удельной активности, отн. ед.	Стандартная ошибка
VPHD	Discovery 710	0,55	0,25
VPHD+PSF	Discovery 710	0,61	0,28
TOF	Discovery 710	0,58	0,21
TOF+PSF	Discovery 710	0,68	0,24
VPHD+PSF	Discovery IQ	0,52	0,24
QClear ($\beta=350$)	Discovery IQ	0,65	0,21

Полученные результаты позволяют наглядно продемонстрировать влияние дополнительного реконструкционного алгоритма PSF (преимущество в формировании коэффициента восстановления наблюдается как для ПЭТ/КТ Discovery 710, так и Discovery IQ) и TOF на коэффициент восстановления. Выполнен анализ влияния аксиальных фильтров и размерности матрицы соответственно.

Рассчитаны значения разницы (в процентах) между коэффициентами восстановления для каждой из сфер диаметрами от 37 мм до 10 мм на ПЭТ изображениях модели-фантома, реконструированных с различными матрицами. Таким образом, разница коэффициентов восстановления сфер на изображениях, реконструированных с матрицами 128x128 и 192x192, составляет 2,66–16,9 % и 2,96–6,90 %, на изображениях реконструированных с матрицами 128x128 и 256x256 составляет 0,38–11,47 % и 1,96–8,51 % (для ПЭТ/КТ Discovery IQ и Discovery 710 соответственно). Несмотря на незначительную разницу коэффициентов восстановления, необходимо учиты-

вать, что это только один из рассматриваемых факторов, влияющих на точность получаемых количественных характеристик, который не учитывают в практической деятельности.

Выполнена оценка влияния фильтра Гаусса на коэффициент восстановления объемной активности. В качестве изменяемых параметров реконструкции использовались размерности фильтра Гаусса: 6 мм, 6,2 мм, 6,4 мм, 6,6 мм (под параметром-размером фильтра Гаусса подразумевается ширина гауссовой кривой, используемой для распределения сигнала одного вокселя по соседним вокселям). На рисунке 3 представлен график зависимости коэффициентов восстановления для каждой из сфер от размерности фильтра, приведены уравнения и соответствующие коэффициенты детерминации (доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая рассматриваемой моделью).



1 – сфера D = 37 мм; 2 – сфера D = 28 мм; 3- сфера D = 22 мм; 4 – сфера D = 17 мм;
5 – сфера D = 13 мм; 6- сфера D = 10 мм

Рисунок 3 – Зависимость коэффициентов восстановления удельной активности сфер (RC) с радиоактивным индикаторным веществом от их размера (x) с учетом параметра фильтра Гаусса

Исходя из анализа функциональной зависимости следует, что при увеличении значения фильтра Гаусса значение коэффициента восстановления (объемной активности) будет линейно убывать. Зависимости коэффициентов восстановления RC от входного параметра фильтра Гаусса (Δ) с соответствующими коэффициентами детерминации:

$$RC = -0,0240 \times \Delta + 0,9849, R^2 = 0,9972 (D = 37 \text{ мм});$$

$$RC = -0,0286 \times \Delta + 1,0058, R^2 = 0,9956 (D = 28 \text{ мм});$$

$$RC = -0,0423 \times \Delta + 0,9877, R^2 = 0,9991 (D = 22 \text{ мм});$$

$$RC = -0,0423 \times \Delta + 1,0006, R^2 = 0,9601 (D = 17 \text{ мм});$$

$$RC = -0,0421 \times \Delta + 0,6443, R^2 = 0,9643 (D = 13 \text{ мм});$$

$$RC = -0,0268 \times \Delta + 0,3222, R^2 = 0,9952 (D = 10 \text{ мм});$$

Полученные в настоящем исследовании результаты убедительно демонстрируют существенное аппаратное занижение объемной активности (в сфере диаметром 10 мм), измеренной в области интереса на реконструированном изображении,

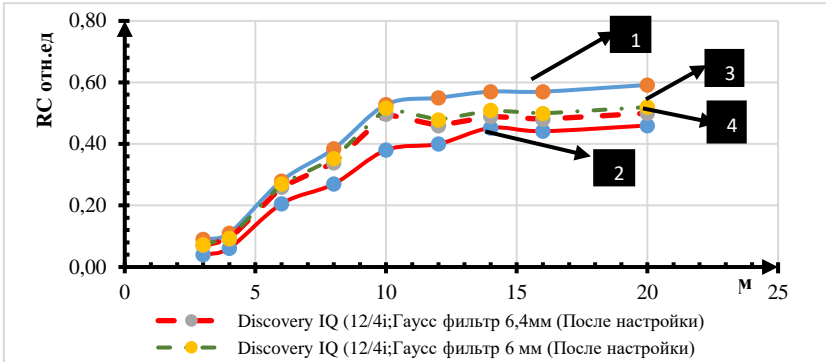
что приводит к ошибочной количественной оценке результатов ПЭТ, а также появлению краевых эффектов, выраженных в некорректном формировании контуров сферы. Представлена оценка влияния реконструкционного алгоритма QClear на RC (при шаге $\beta = 50$). Коэффициент β является единственной пользовательской входной переменной данного алгоритма и позволяет регулировать объем помех, вводимых при каждой итерации. Для сфер диаметром более 22 мм влияние коэффициента β на коэффициент восстановления можно охарактеризовать, как незначительное. Однако для сфер диаметром 10 мм наблюдается изменение RC в пределах 8 %.

Выполнен анализ влияния входных параметров итерационного алгоритма (количество итераций и подмножеств) на формирование коэффициентов восстановления. Результаты полученных исследований позволяют увеличить точностные характеристики при определении объемной активности.

На основе полученных результатов влияния параметров сканирования на коэффициент восстановления предложен метод настройки параметров сканирования для томографов с 2-мя различными детектирующими системами (с кристаллами *LYSO* и *BGO*) который заключается в измерении коэффициентов восстановления удельной активности радиоактивного индикаторного вещества моделей-сфер на ПЭТ изображениях, полученных в результате сканирования фантома на каждом из томографов, расчет относительной разницы полученных значений $RC_{\text{отн}}$, сокращение $RC_{\text{отн}}$ за счет изменений параметров сканирования.

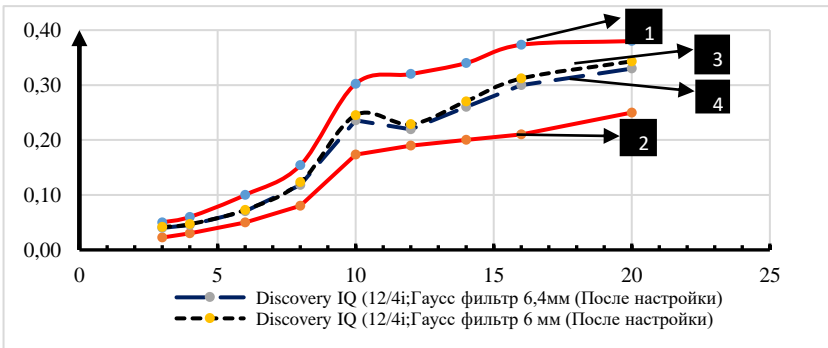
Данный метод является особо актуальным в случае использования томографов с различающимися детектирующими системами и программными комплексами. Настройка параметров сканирования томографов с различными детектирующими системами позволяет повысить информационную надежность диагностических данных, получаемых на изображениях.

Емкость фантома и сферы наполняли радиоактивным индикаторным веществом в соотношениях 3:1, 4:1, 6:1, 8:1, 10:1, 12:1, 14:1, 16:1, 20:1. Общая активность в объеме фантома и инсталлированных внутрь сферах составляла 50 МБк в каждом из экспериментов, а соотношение сфера/фон меняли, что позволило имитировать различные случаи накопления индикаторного вещества в моделях-сферах (очагах). Выполнен расчет коэффициентов восстановления для каждой из сфер, вычислено относительное значение разницы между коэффициентами восстановления удельной активности индикаторного вещества в сферах по изображениям, полученным на каждом из томографов. Далее, меняя параметры реконструкции изображений, уменьшили разницу между коэффициентами восстановления удельной активности (руководствуясь результатами оценки влияния параметров сканирования на коэффициент восстановления). На рисунках 4, 5 представлены зависимости коэффициентов восстановления сфер (диаметрами 10мм и 13 мм) от соотношения объемной активности сфера/фон для ПЭТ/КТ Discovery IQ и Discovery 710 до и после настройки томографов.



1 – зависимость коэффициентов восстановления от соотношения (м) сфера/фон для ПЭТ/КТ DISCOVERY 710; 2 – зависимость коэффициентов восстановления от соотношения сфера/фон для ПЭТ/КТ DISCOVERY IQ (до изменения параметров реконструкции изображения); 3, 4 – зависимость коэффициентов восстановления от соотношения сфера/фон для ПЭТ/КТ DISCOVERY IQ (после изменения параметров реконструкции изображения)

Рисунок 4 – Зависимость коэффициентов восстановления от соотношения удельной активности радиоактивного индикаторного вещества для сферы диаметром 13 мм



1 – зависимость коэффициентов восстановления от соотношения сфера/фон для ПЭТ/КТ DISCOVERY 710; 2 – зависимость коэффициентов восстановления от соотношения сфера/фон для ПЭТ/КТ DISCOVERY IQ (до изменения параметров реконструкции изображения); 3, 4 – Зависимость коэффициентов восстановления от соотношения сфера/фон для ПЭТ/КТ DISCOVERY IQ (после изменения параметров реконструкции изображения)

Рисунок 5 – Зависимость коэффициентов восстановления от соотношения удельной активности радиоактивного индикаторного вещества для сферы диаметром 10 мм

Уменьшение разницы между коэффициентами восстановления на 2-х томографах было получено за счет изменения числа итераций и размерности фильтра Гаусса

В главе 3 получены результаты влияния реконструкционных параметров на качественные и количественные характеристики ПЭТ изображений, полученных при сканировании биологических объектов и их моделей. В главе выполнен комплексный подход к исследованию влияния реконструкционных параметров и времяпролетной технологии на качественные (контраст, шум, соотношение сигнал/шум) и количественные (стандартизированный показатель накопления радиофармацевтического препарата в патологических очагах, метаболический объем патологического очага). Предложены оптимальные параметры реконструкции ПЭТ изображения.

Выполнена предварительная оценка влияния длительности сканирования (с учетом реконструкционных алгоритмов) на шум и контраст изображений, полученных при сканировании модели участка тела с патологическими очагами накопления индикаторного вещества (водонаполненного фантома с РФП с инсталлированными внутри 6-ю сферами). Полученные результаты позволили выявить оптимальный алгоритм реконструкции, работающий в комбинации с PSF функцией при различном времени сбора данных детектирующей системой. Последующий анализ качества изображений выполнен на основе ПЭТ изображений пациентов с учетом положительных результатов вышеописанного эксперимента.

В данной главе выполнен детальный анализ влияния входных параметров итерационного алгоритма VPHD (количество итераций и подмножеств) на качественные и количественные характеристики ПЭТ изображения (далее характеристики изображения). Получены функциональные зависимости характеристик изображения от входных параметров реконструкционного алгоритма (количество итераций и подмножеств) с учетом использования дополнительной PSF функции, а также времяпролетной технологии (TOF). Увеличение числа итераций сопровождается линейным возрастанием контраста и шума (с увеличением числа итераций на 1 единицу значение контраста возрастает на ~8 %). Выполнен детальный анализ влияния входного параметра β , реконструкционного алгоритма QClear на характеристики ПЭТ изображения. На рисунке 6 представлены трехмерные изображения пациента, реконструированные с различным параметром β , а на рисунке 7 график зависимости контраста от параметра β . С увеличением параметра β уменьшается вклад шумовой компоненты, однако наблюдается линейное снижение контраста.

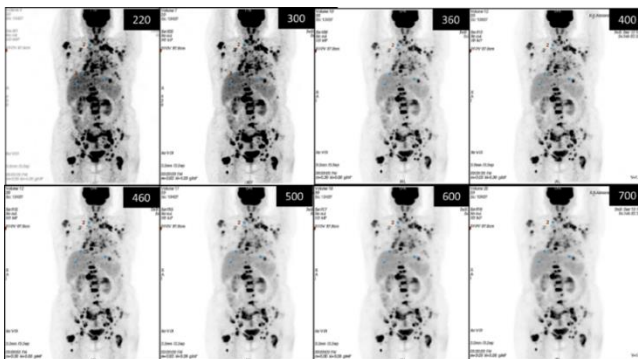
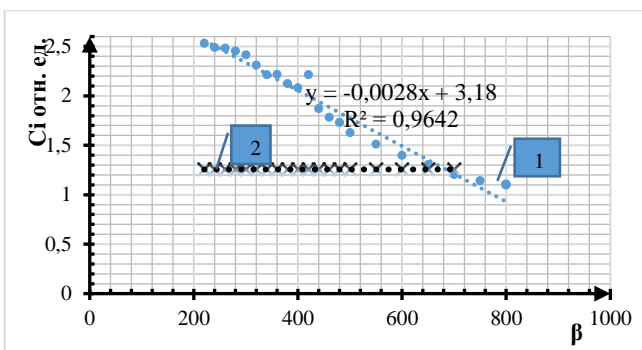


Рисунок 6 – Трехмерные изображения пациента, реконструированные с различным параметром β (значение входного параметра β представлено в правом верхнем углу)



- 1 – линейное убывание контраста очага накопления радиоактивного индикаторного вещества при увеличении коэффициента β алгоритма реконструкции QClear;
 2 – значение контраста очага накопления радиоактивного индикаторного вещества при использовании алгоритма реконструкции VPHD (4 – итерации)
 Рисунок 7 – Зависимость контраста (C_i) от параметра β (пунктирной линией, параллельной Ox представлено значение контраста при использовании итерационного алгоритма VPHD)

Также представлены результаты оценки влияния фильтра Гаусса на характеристики изображения.

Получены зависимости характеристик изображения от длительности сканирования (длительность сбора данных) с учетом реконструкционных алгоритмов для ПЭТ/КТ Discovery IQ на основе анализа изображений биологических объектов.

Особое внимание уделено принципу использования Z-аксиальных фильтров. На основе статистического анализа (непараметрическая статистика) выявлено, что использование данных фильтров значительно влияет на подавление шумовой компоненты и несущественно сказывается на количественных характеристиках изображения, что позволяет применять данный тип фильтрации без опасения влияния на увеличение ошибки при оценке динамики развития патологического процесса.

На 3D принтере были распечатаны сферы диаметрами 4 и 6 мм и установлены в фантом ИЕС (рисунок 8). Проведено по 4 сканирования на ПЭТ/КТ Discovery IQ и Discovery 710 модели (фантома) последовательно наполненного ^{18}F -ФДГ в соотношении сфера/фон 10/1, 12/1, 14/1, 16/1 с последующими реконструкциями полученных серий ПЭТ изображений.

Получены функциональные зависимости контраста от соотношения удельной активности сфера/фон. На рисунках 9, 10 представлены аксиальные проекции фантома, где соотношение удельной активности сфера/фон составило 10:1. На рисунке 9 отчетливо видно, что сферы диаметром 4 мм не визуализируются, в отличие от рисунка 10. Значение контраста принято равным единице, тогда сфера диаметром 4 мм не будет визуализирована. На этой основе рассчитаны прогнозные значения соотношения сфера/фон, которые являются предельными значениями визуализации патологических очагов с учетом реконструкционных параметров.

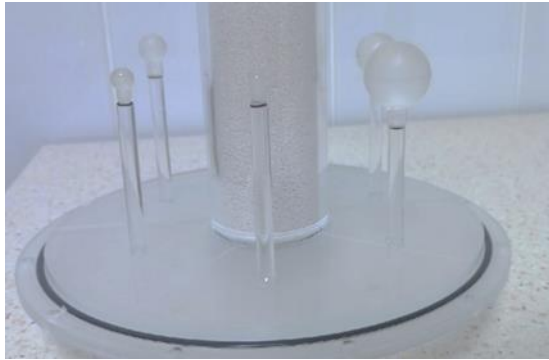


Рисунок 8 – Сферы, установленные в крышку фантома ПЕС (модели очагов накопления радиофармацевтического препарата-индикаторного вещества)

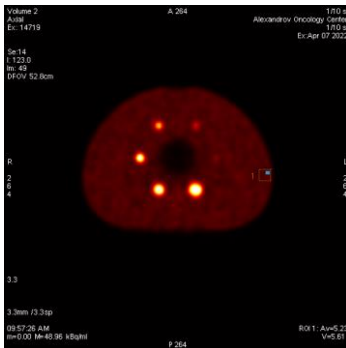


Рисунок 9 – Аксиальная проекция изображения, полученная при сканировании фантома ПЕС на ПЭТ/КТ Discovery 710 (сбор данных с TOF функцией)

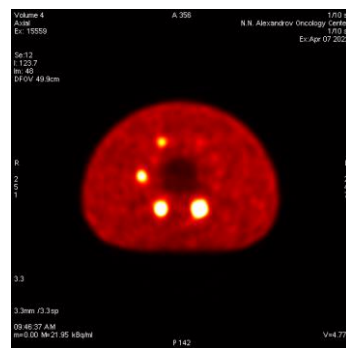
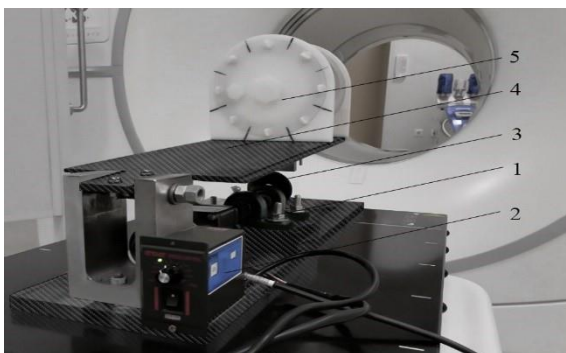


Рисунок 10 – Аксиальная проекция изображения, полученная при сканировании фантома ПЕС на Discovery IQ с алгоритмом реконструкции VPHD+PSF

В главе 4 представлена запатентованная установка, позволяющая моделировать дыхательные движения, оценивать их влияние на качественные и количественные характеристики ПЭТ изображений с использованием моделей, рассчитывать объемы оконтуривания моделей в динамическом состоянии, что может применяться для поправок полей в лучевой терапии. Рассмотрено влияние параметров сканирования на формирование областей оконтуривания на диагностических ПЭТ изображениях биологических объектов.

На рисунке 11 изображена демонстрационная версия установки для имитации дыхательных движений пациента с установленной моделью тела-фантомом, внутрь которого установлены модели патологических очагов-опухолей - сферы (водонаполненный фантом со сферами). Модель позиционирована на подвижной платформе таким образом, чтобы металлические детали конструкции не попадали в поле

зрения компьютерного томографа с целью минимизации риска появления артефактов. Предусмотрена возможность регулирования скорости движения имитационного устройства. Получен патент на данное изобретение.



1 – Мотор-редуктор; 2 – регулятор скорости; 3 – вал с кулачком; 4 – подвижная платформа; 5 – модель участка тела с патологическими очагами накопления радиофармацевтического препарата (водонаполненный фантом со сферами)
Рисунок 11 – установка для оценки влияния дыхательных движений на характеристики ПЭТ изображений

Приведены результаты трех последовательных экспериментов (рисунок 12), в которых получены зависимости коэффициентов восстановления от размеров сфер с учетом динамического и статического положений модели (фантома).

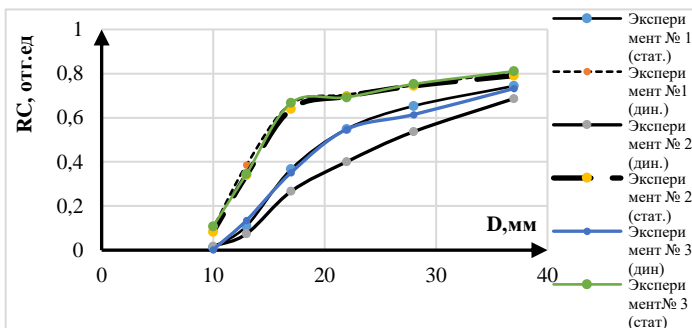


Рисунок 12 – Зависимости коэффициентов восстановления от размеров сфер с учетом движения модели (фантома), полученные на основе результатов 6-ти последовательных сканирований фантома (3 статическом положении, 3 в динамическом положении)

Важно отметить, что коэффициенты восстановления объемной активности в статическом состоянии, полученные в результате анализа изображений на сериях QClear и VPHD, соответствуют результатам, полученным ранее с использованием фантома IEC.

Также выполнена оценка влияния движений (имитирующих дыхательный цикл) на формирование значений контраста. На рисунке 13 представлены результаты сравнения (в процентном соотношении изменение контраста в статическом и динамическом состояниях фантома в каждом из 4-х экспериментов и средние значения девиации контраста для каждой из сфер).

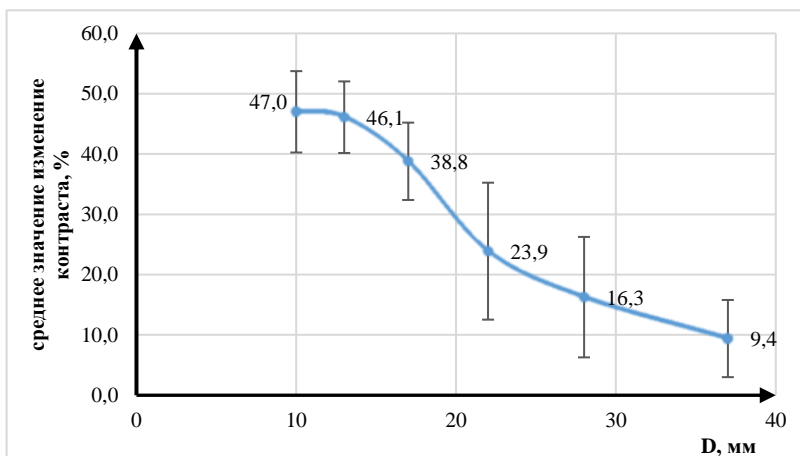
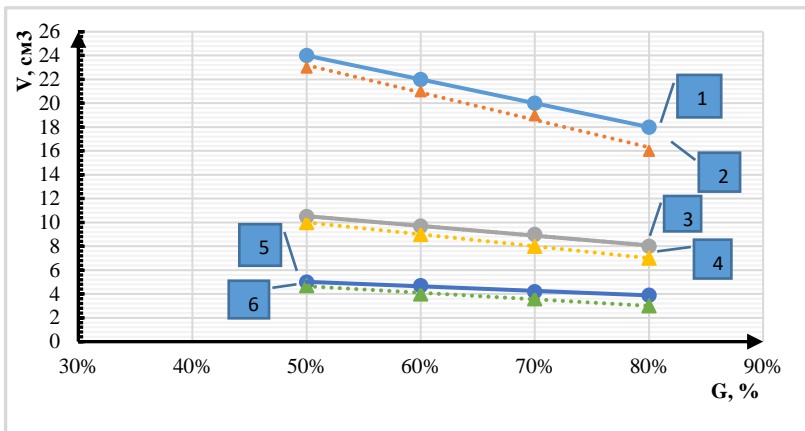


Рисунок 13 – Среднее значение изменения контраста в статическом и динамическом состояниях для каждой из сфер

Преимущества заявляемого способа контроля качества изображения в позитронно-эмиссионной томографии при сканировании движущегося объекта заключаются в том, что способ позволяет оценить влияния дыхательных движений на количественные (коэффициент восстановления) и качественные (контраст) характеристики ПЭТ изображений путем имитации движений, возникающих в процессе дыхательного цикла.

Оригинальная конструкция установки, имитирующей дыхательные движения, успешно апробирована и синхронизирована с системой «респираторий Гейтингга» (установка, используемая для контроля амплитуды и скорости движения биологического объекта).

Выполнена серия экспериментов направленных на изучение и получение зависимостей оконтуренного (по ПЭТ изображению) объема статической и динамической мишени от уровня цветового градиента и последующий сравнительный анализ оконтуренных объемов моделей патологических очагов накопления РФП в статическом (стат.) и динамическом (дин.) положениях (рисунок 14).



1 – D = 37 мм (стат.); 2 – D = 37 мм (дин.); 3 – D = 28 мм (стат.); 4 – D = 28 мм (дин.);
5 – D = 22 мм (стат.); 6 – D = 22 мм (дин.)

Рисунок 14 – Зависимости оконтуренных объемов (V) патологических очагов накопления РФП от уровня градиента (G) в статическом и динамическом положениях (сплошной линией представлены графики зависимостей моделей патологических очагов в статическом состоянии, а пунктирной в динамическом)

Моделируемые респираторные движения проявляются на изображении как «размывание очага» и расширение границ градиента. Выполнен расчет ошибки (%) оконтуренного объема по отношению к номинальному для каждой из рассматриваемых сфер.

На моделях диаметрами 28 мм и 37 мм данный эффект проявляется незначительно, ошибка определения объемов статического и динамического положений для градиента 50 % составляет от ~3 % до 9 %, а ошибка определения объемов для сферы 10 мм достигает ~24 %.

На основе полученных функциональных зависимостей объема оконтуривания от уровня градиента рассчитано оптимальное значение градиента для каждой из рассматриваемых моделей патологического очага накопления РФП для динамического положения:

$V = -23 \times G + 34,7$, $R^2 = 0,9936$ (D = 37 мм); прогнозируемое значение градиента 35 %;

$V = -10,2 \times G + 15$, $R^2 = 0,9438$ (D = 28 мм); прогнозируемое значение градиента 35 %;

$V = -5,5 \times G + 7,4$, $R^2 = 0,9890$ (D = 22 мм); прогнозируемое значение градиента 33 %;

$V = -1,45 \times G + 4,21$, $R^2 = 0,9657$ (D = 17 мм); прогнозируемое значение градиента 37 %;

$V = -1,45 \times G + 1,58$, $R^2 = 0,9524$ (D = 13 мм); прогнозируемое значение градиента 29 %;

$V = -0,65 \times G + 0,71$, $R^2 = 0,9797$ ($D = 10$ мм); прогнозируемое значение градиента 28 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

Диссертационная работа посвящена комплексному изучению факторов, влияющих на качественные и количественные характеристики ПЭТ изображений. Впервые получены следующие результаты:

1. Установлен характер зависимости между входными параметрами сканирования и SNR, контрастом, шумом, количественными характеристиками ПЭТ изображения, а также исследованы возможности оптимизации качества получаемого изображения за счет изменения следующих параметров: размерности матрицы, аксиальных фильтров (3 фильтра), входных параметров алгоритма VPHD (количество итераций и подмножеств), входного параметра β алгоритма QClear (в широком диапазоне 220-800 ед.) [1; 2; 3; 10; 11].

2. Рассчитаны прогнозные значения соотношения накопления индикаторного вещества сфера/фон, для биологических моделей диаметрами 4 и 6 мм (имитирующие соотношение удельной активности радиофармацевтического препарата (очаг-опухоль/фоновый орган), являющиеся предельными значениями, при которых могут быть зарегистрированы на ПЭТ изображениях модели рассматриваемого диаметра: томограф Discovery IQ (диаметры моделей 4 мм, 6 мм) – соотношение индикаторного вещества модели и на ее фоне 6,5 отн. ед и 7,6 отн. ед. соответственно, томограф Discovery 710 (диаметры моделей 4 мм, 6 мм) – соотношение индикаторного вещества модели и на ее фоне 3,67 отн. ед. и 4,9 отн. ед. [4; 8;].

3. Установлены зависимости между входными параметрами итерационного алгоритма VPHD и коэффициентами восстановления удельной активности моделей-сфер, а именно увеличение числа итераций и подмножеств сопровождается линейным ростом коэффициентов восстановления, в то время, как увеличение входного параметра фильтра Гаусса вызывает его линейное убывание. Получены численные результаты сравнения коэффициентов восстановления удельной активности сфер диаметрами от 37 мм до 10 мм при сравнении изображений, реконструированных с различными матрицами и Z-аксиальными фильтрами [4, 9].

4. Предложен метод коррекции параметров сканирования на основе коэффициентов восстановления объемной активности биологических моделей очагов накопления индикаторного вещества, которая позволяет минимизировать ошибку при фиксации объемной активности (стандартизированных показателей накопления) при оценке динамики патологических процессов в случае использования томографов с различными детектирующими системами. Разница коэффициентов восстановления после коррекции составила: 7,57 %, 6,7 %, 9,28 %, 13,93 %, 11,43 %, 11,58 % для сфер диаметрами 37 мм, 28 мм, 22 мм, 17 мм, 13 мм, 10 мм соответственно [4].

5. Впервые создано устройство для моделирования респираторных движений, позволяющее выполнять контроль качества характеристик диагностических изображений при исследовании динамических объектов и учитывать смещения патологических очагов в процессе планирования лучевой терапии по ПЭТ/КТ изображениям

с учетом амплитуды смещения и их размеров, а также выбрать наиболее оптимальные методы сканирования для планирования лучевой терапии, что позволило получить прогнозируемые значения уровня градиента для оконтуривания опухолей различного размера (для сфер диаметрами 17 мм, 13 мм, 10 мм значение градиента составило 37 %, 29 %, 28 %) [6].

6. Рассчитана разница коэффициентов восстановления удельной активности моделей-сфер на изображениях, полученных в статическом и динамическом состоянии модели-фантома при использовании устройства для моделирования респираторных движений, а именно для сфер диаметрами от 37 мм до 10 мм разница составляет от 11,42 % до 85,53 % (на изображениях полученных с реконструкционным алгоритмом VPHD на ПЭТ/КТ Discovery IQ) и от 28,26 % до 78,34 % (на изображениях полученных с реконструкционным алгоритмом VPHD на ПЭТ/КТ Discovery 710) [5; 16–18].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Представленные расчеты и функциональные зависимости качественных и количественных характеристик от входных параметров сканирования позволяют оптимизировать качество ПЭТ изображения путем одновременного изменения нескольких характеристик, а не только единственной входной величины реконструкционного алгоритма.

2. Полученные результаты позволяют оценивать изменение контраста, шума, SNR на основе представленных функциональных зависимостей, а также могут быть использованы, как методическое обеспечение для медицинских физиков и радиологов при проведении процедур контроля качества ПЭТ и диагностики биологических объектов.

3. Предложенная методика коррекции параметров сканирования на томографах с различными детектирующими системами может использоваться в клиниках с отсутствующей полной технической базой, необходимой для проведения NEMA тестов.

4. Представленное устройство для моделирования респираторных движений биологического объекта расширяет возможности медицинского физика в области контроля качества созданных стандартов сканирования и минимизирует риски потери диагностической информации вследствие влияния респираторных движений биологических объектов. Производство данного устройства не требует значительных материальных затрат и позволяет оснастить им диагностические отделения позитронно-эмиссионной томографии.

5. Социальная значимость данной работы состоит в том, что: 1) использование устройства для моделирования респираторных движений биологического объекта позволяет сделать процедуру планирования лучевой терапии более эффективной и безопасной, 2) настройка томографов с различными детектирующими системами приводит к уменьшению разницы между коэффициентами восстановления двух томографов, что в совокупности позволяет избежать дополнительных исследований биологических объектов на ПЭТ/КТ, а соответственно и снизить радиационную нагрузку на биологические объекты.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ

Статьи

1. Емельяненко, Е. В. Влияние параметров реконструкции на качество изображений в ПЭТ/КТ диагностике / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Журн. Бел. гос. ун-та. Экология. – 2020. – № 2 (81). – С. 57–64.
2. Емельяненко, Е. В. Анализ системы контроля качества позитронно-эмиссионной томографии в Республике Беларусь / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Журн. Бел. гос. ун-та. Экология. – 2020. – № 2 (81). – С. 65–72. № 4. – С. 496–504.
3. Емельяненко, Е. В. Влияние итерационных алгоритмов на качество изображения и полуколичественные характеристики накопления РФП / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Вестн. национального ядерного центра Респ. Казахстан. – 2020. – № 2 (81). – С. 61–69.
4. Емельяненко, Е. В. Влияние реконструкционных параметров сканирования позитронно-эмиссионного томографа на эффект частичного объема патологического очага / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин, П. А. Белобоков // Известия Нац. Акад. наук Беларуси. Серия физ.-тех. наук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 356–364.
5. Емельяненко, Е. В. Методика и аппаратные средства оценки количественных характеристик ПЭТ-изображений при исследовании динамических объектов / Е. В. Емельяненко, М. Н. Петкевич, И. Г. Тарутин // Известия Нац. Акад. Наук Беларуси. Серия физ.-тех. наук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 496–504.
6. Оконтуривание движущихся объектов по изображениям, полученным на позитронно-эмиссионном томографе / Е. В. Емельяненко, В. В. Дарахвелидзе, М. Н. Петкевич, И. Г. Тарутин // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2023. – № 1. – С. 32–40.

Материалы конференций

7. Емельяненко, Е. В. Влияние параметра фильтра cut-off на полуколичественные значения и качество диагностического ПЭТ изображения / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2020: environmental problems of the XXI century : материалы 20-й Междунар. науч. конф., 21–22 мая 2020 г., Минск : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, канд. тех. наук, доц. М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2020. – Ч. 1. – С. 347–350.
8. Емельяненко, Е. В. Оценка коэффициента восстановления для позитронно-эмиссионного томографа DISCOVERY / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2020: environmental problems of the XXI century : материалы 20-й Междунар. науч. конф., 21–22 мая 2020 г., Минск : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, канд. тех. наук, доц. М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2020. – Ч. 1. – С. 350–353.
9. Емельяненко, Е. В. Оценка влияния параметров реконструкции диагностического ПЭТ-изображения на коэффициент восстановления / Е. В. Емелья-

ненко, В. В. Дарахвелидзе // Современные вопросы радиационной и экологической медицины, лучевой диагностики и терапии: сб. материалов Респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 24–25 сентября 2020 г., Гродно / Мин-во здравоохранения Респ. Беларусь, УО «Гродненский гос. мед. ун-т», кафедра лучевой диагностики и лучевой терапии ; редкол.: А. С. Александрович (отв. ред.), Т. И. Зиматкина. – Гродно, 2020. – С. 113–116.

10. Емельяненко, Е. В. Анализ качества изображений ПЭТ и параметров реконструкции / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Сахаровские чтения 2019 года: экологические проблемы XXI века : материалы 19-й Междунар. науч. конф., 23–24 мая 2019 г., Минск : в 3 ч. / МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка. – Минск : ИВЦ Минфина, 2019. – Ч. 3. – С. 192–195.

11. Емельяненко, Е. В. Оценка качества ПЭТ/КТ изображений реконструированного с различными матрицами / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2018: environmental problems of the XXI century : материалы 18-й Междунар. науч. конф., 17–18 мая 2018 г., Минск : в 3 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, д-ра с.-х. наук, проф. С. С. Позняка. – Минск : ИВЦ Минфина, 2018. – Ч. 2. – С. 205.

12. Емельяненко, Е. В. Современная система контроля качества позитронно-эмиссионного томографа, совмещенного с компьютерным томографом / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Сахаровские чтения 2017 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2017: environmental problems of the XXI century : материалы 17-й Междунар. науч. конф., 18–19 мая 2017 г., Минск : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: С. Е. Головатый [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, д-ра с.-х. наук, проф. С. С. Позняка. – Минск : ИВЦ Минфина, 2017. – Ч. 2. – С. 83–84.

13. Емельяненко, Е. В. Программа контроля качества для позитронно-эмиссионного томографа, совмещенного с компьютерным томографом / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин, А. В. Савков // Докл. БГУИР. – 2016. – № 7. – С. 304–308.

14. Емельяненко, Е. В. Сравнение методов однофотонной и позитронно-эмиссионной диагностики с учетом аппаратных средств / Е. В. Емельяненко, А. В. Савков // Физика конденсированного состояния : материалы XXIV Междунар. науч.-практ. конф. аспирантов, магистрантов и студентов, 21 апреля 2016 г., Гродно / Гродн. гос. ун-т им. Я. Купалы, физ.-техн. фак. ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 155–157.

15. Емельяненко, Е. В. Влияние отдельных параметров диагностического протокола на качественные и количественные характеристики диагностического ПЭТ изображения / Е. В. Емельяненко, К. В. Поддубный // Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2022: environmental problems of the XXI century : материалы 22-й Междунар. науч. конф., 19–20 мая 2022 г., Минск : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, канд. тех. наук, доц. М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 268–271.

16. Применение систем синхронизации по дыханию для диагностики и лечения онкологических заболеваний / Я. Э. Ермольчик, Т. С. Чикова, Е. В. Емельяненко, М. Н. Петкевич // Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2022: environmental problems of the XXI century : материалы 22-й Междунар. науч. конф., 19–20 мая 2022 г., Минск : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, канд. тех. наук, доц. М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 223–226.

17. Зинчук, В. М. Особенности контурирования моделей опухолей на ПЭТ изображении с учетом респираторных движений / В. М. Зинчук, Е. В. Емельяненко // Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2023: environmental problems of the XXI century : материалы 23-й Междунар. науч. конф., 18–19 мая 2023 г., Минск : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра биол. наук, доц. О. И. Родькина, канд. тех. наук, доц. М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – Ч. 1. – С. 325–328.

18. Контроль качества в лучевой терапии и системах контроля дыхания / Я. Э. Русак, Т. С. Чикова, Е. В. Емельяненко, О. С. Февралева // Сахаровские чтения 2023 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2023: environmental problems of the XXI century : материалы 23-й Междунар. науч. конф., 18–19 мая 2023 г., Минск : в 2 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел. гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра биол. наук, доц. О. И. Родькина, канд. тех. наук, доц. М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2023. – Ч. 1. – С. 311–314.

Тезисы докладов

19. Емельяненко, Е. В. Вычисление оптимального коэффициента реконструкционного алгоритма Qclear при ПЭТ/КТ визуализации / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин, А. В. Дзюбан // Медицинская физика. – 2019. – № 2 (82). – С. 129.

20. Емельяненко, Е. В. Разработка и внедрение методики контроля качества аппаратов для позитронно-эмиссионной томографии. – Евраз. онколог. журн. – 2016. – Ч. 4, № 2. – С. 77.

21. Emelyanenko, E. V. / The method for visualization quality assessing for the objects in positron emission tomography images / E. V. Emelyanenko, M. N. Petkevich, I. G. Tarutin // NUCLEOUS-2022: fundamental problems and applications : LXXII International conf., July 11–16, 2022, Moscow ; Book of abstracts ; ed. K. A. Stopani, N. S. Zelenskaya. – Saratov : Amirit, 2022. – P. 420

22. Емельяненко, Е. В. / Аспекты радиационной безопасности ПЭТ-КТ диагностики / Е. В. Емельяненко, О. А. Барановский, И. Г. Тарутин // Сахаровские чтения 2016 года: экологические проблемы XXI века : материалы 16-й Междунар. науч. конф., 19–20 мая 2016 г., Минск ; под ред. С. А. Маскевича, С. С. Позняка, Н. А. Лысухо. – Минск : МГЭИ им. А. Д. Сахарова БГУ, 2016. – С. 235.

23. Емельяненко, Е. В. Оценка качества ПЭТ/КТ изображений реконструированного с различными матрицами / Е. В. Емельяненко, А. Г. Тукин // Сахаровские чтения 2018 года: экологические проблемы XXI века = Sakharov readings 2018: environmental problems of the XXI century : материалы 18-й Междунар. науч. конф., 17–18 мая 2018 г., Минск : в 3 ч. / Междунар. гос. экол. ин-т им. А. Д. Сахарова Бел.

гос. ун-та ; редкол.: А. Н. Батян [и др.] ; под ред. д-ра физ.-мат. наук, проф. С. А. Маскевича, д-ра с.-х. наук, проф. С. С. Позняка. – Минск : ИВЦ Минфина, 2018. – Ч. 2. – С. 205–206.

24. Pytlak, E. Features of using pet imaging for radiotherapy planning / E. Pytlak, E. Emelyanenko, M. Petkevich // Actual environmental problems : proceedings of the XII International scientific conference of young scientists, graduates, master and PhD students, 1–2 December 2022, Minsk. – P. 166–167.

25. Features of using pet imaging for radiotherapy planning / E. Emelyanenko, M. Petkevich, T. Chikova, V. Plokhodko // Actual environmental problems : proceedings of the XII International scientific conference of young scientists, graduates, master and PhD students, 1–2 December 2022, Minsk. – P. 133–134.

26. Емельяненко, Е. В. Оценка влияния числа итераций на количественные показатели и качество ПЭТ-изображения / Е. В. Емельяненко, И. Г. Тарутин // Медицинская физика. – 2020. – № 1. – С. 18–19.

Патент

27. Способ оценки качества изображения позитронно-эмиссионного томографа (ПЭТ) при сканировании движущейся биологической модели: пат. ВУ 23834 / Е. В. Емельяненко, М. Н. Петкевич, П. А. Белобоков. – Опубл. 30.10.2022.

РЭЗІЮМЭ Емяльяненка Яўген Уладзіміравіч

Метады і сродкі кантролю характарыстыкі дыягнастычных ПЭТ выяў біялагічных аб'ектаў і іх мадэлі

Ключавыя словы: кантроль якасці, пазітронна-эмісійная тамаграфія, дыягнастычная выява, якасць выявы, каэфіцыент аднаўлення, алгарытм рэканструкцыі.

Мэта даследавання: распрацоўка метадаў і тэхнічных сродкаў кантролю пры вызначэнні асноўных характарыстык дыягнастычных ПЭТ выяў абласцей назапашвання радыеактыўнага індыкатарнага рэчыва пры дыягностыцы ачагоў назапашвання радыёфармацэўтычнага прэпарата і нанясення іх контуру з улікам алгарытму рэканструкцыі і знаходжання даследуемага аб'екта.

Метады даследавання: прымяняліся метады вымярэння актыўнасці радыёфармпрэпарата з выкарыстаннем калібрата ра актыўнасці, вымяраліся колькасныя характарыстыкі на ПЭТ выявах пацыентаў і мадэляў з наступным разлікам кантрасту, шуму, каэфіцыентаў аднаўлення ўдзельнай актыўнасці.

Атрыманя вынікі і іх навізна. Устаноўлена залежнасць паміж уваходнымі параметрамі дыягнастычнага пратакола, а таксама некаторымі ўмовамі сканіравання пацыентаў, якаснымі і колькаснымі характарыстыкамі дыягнастычнай ПЭТ-выявы. Даследаваны магчымасці аптымізацыі якасці дыягнастычнай выявы за кошт змянення ўваходных параметраў рэканструкцыйных алгарытмаў, а таксама памернасці матрыцы і фільтраў. Упершыню створаны прыбор для кантролю якасці характарыстык дыягнастычных выяў пры даследаванні дынамічных аб'ектаў, які дазваляе ўлічваць зрушэнні паталагічных ачагоў у працэсе планавання прамянёвай тэрапіі па ПЭТ / КТ выявах.

Рэкамендацыі па выкарыстанні вынікаў або вобласць практычнага прымянення. Атрыманя вынікі дазваляюць ацэньваць змяненне кантрасту, шуму, SNR на аснове прадстаўленых функцыянальных залежнасцяў, а таксама могуць быць выкарыстаны як метадычнае забеспячэнне для медыцынскіх фізікаў і радыёлагаў пры правядзенні працэдур кантролю якасці ПЭТ і дыягностыкі біялагічных аб'ектаў. Прапанаваная метадыка карэкцыі параметраў сканіравання на тамаграфіях з рознымі сістэмамі дэтэктавання можа выкарыстоўвацца ў клініках з адсутнай поўнай тэхнічнай базай, неабходнай для правядзення NEMA тэстаў.

РЕЗЮМЕ

Емельяненко Евгений Владимирович

Метод и средства контроля характеристик диагностических ПЭТ изображений биологических объектов и их моделей

Ключевые слова: контроль качества, позитронно-эмиссионная томография, диагностическое изображение, качество изображения, коэффициент восстановления, алгоритм реконструкции.

Цель исследования: разработка методов и технических средств контроля при определении основных характеристик диагностических ПЭТ изображений областей накопления радиоактивного индикаторного вещества при диагностике очагов накопления радиофармацевтического препарата и их оконтуривания с учетом алгоритма реконструкции и положения исследуемого объекта.

Методы исследования: применялись методы измерения активности радиофармпрепарата с использованием калибратора активности, измерялись количественные характеристики на ПЭТ изображениях пациентов и моделей с последующим расчетом контраста, шума, коэффициентов восстановления удельной активности.

Полученные результаты и их новизна. Установлена зависимость между входными параметрами диагностического протокола, а также некоторыми условиями сканирования пациентов, качественными и количественными характеристиками диагностического ПЭТ-изображения. Исследованы возможности оптимизации качества диагностического изображения за счет изменения входных параметров реконструкционных алгоритмов, а также размерности матрицы и фильтров. Впервые создан прибор для контроля качества характеристик диагностических изображений при исследовании динамических объектов, позволяющий учитывать смещения патологических очагов в процессе планирования лучевой терапии по ПЭТ/КТ изображениям.

Рекомендации по использованию результатов или область практического применения. Полученные результаты позволяют оценивать изменение контраста, шума, SNR на основе представленных функциональных зависимостей, а также могут быть использованы как методическое обеспечение для медицинских физиков и радиологов при проведении процедур контроля качества ПЭТ и диагностики биологических объектов. Предложенная методика коррекции параметров сканирования на томографах с различными детектирующими системами может использоваться в клиниках с отсутствующей полной технической базой, необходимой для проведения NEMA тестов.

SUMMARY

Emelianenka Yaheni

Methods and means of control characteristics diagnostic PET images of biological objects and their models

Key words: quality control, positron emission tomography, diagnostic images, image quality, recovery coefficient, reconstruction algorithm.

Purpose of the study: to develop methods and technical means of control in determining the main characteristics of diagnostic PET images of areas of accumulation of a radioactive tracer substance in the diagnosis of foci of accumulation of a radiopharmaceutical and their delineation, taking into account the reconstruction algorithm and the position of the object under study.

Research methods: methods were used to measure the activity of a radiopharmaceutical using an activity calibrator; quantitative characteristics were measured on PET images of patients and models with subsequent calculation of contrast, noise, and specific activity recovery coefficients.

The results obtained and their novelty. A relationship has been established between the input parameters of the diagnostic protocol, as well as some conditions for scanning patients, and the qualitative and quantitative characteristics of the diagnostic PET image. The possibilities of optimizing the quality of a diagnostic image by changing the input parameters of reconstruction algorithms, as well as the dimensions of the matrix and filters, have been studied. For the first time, a device has been created to control the quality of the characteristics of diagnostic images when studying dynamic objects, allowing to take into account the displacement of pathological foci in the process of planning radiation therapy using PET/CT images.

Recommendations for using the results or areas of practical application. The results obtained make it possible to evaluate changes in contrast, noise, and SNR based on the presented functional dependencies, and can also be used as methodological support for medical physicists and radiologists when carrying out PET quality control procedures and diagnostics of biological objects. The proposed method for correcting scanning parameters on tomographs with various detection systems can be used in clinics that are not equipped with the full technical base necessary to conduct NEMA tests.

