

Учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и
радиоэлектроники»

Объект авторского права
УДК [621.384.64:539.1.089.6]: 615.849.1

ПЕТКЕВИЧ
Максим Николаевич

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ
ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.17 – приборы, системы
и изделия медицинского назначения

Минск 2026

Научная работа выполнена в учреждении образования «Международный государственный экологический институт им. А. Д. Сахарова» Белорусского государственного университета.

Научный
руководитель

Тарутин Игорь Германович, доктор технических наук, профессор, медицинский физик отдела по инженерному обеспечению лучевой терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова»

Официальные
оппоненты:

Лыньков Леонид Михайлович, доктор технических наук, профессор, заместитель главного редактора журнала «Доклады БГУИР»

Дубовский Владимир Андреевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела систем активной безопасности и управления государственного научного учреждения «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларусь»

Оппонирующая
организация

Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»
Национальной академии наук Беларусь

Защита состоится 26 февраля 2026 г. в 14⁰⁰ на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.06 при учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» по адресу: 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, корп. 1, ауд. 232, тел. +375-17-293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

Автореферат разослан 23 января 2026 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций
кандидат технических наук, доцент

О. В. Бойправ

ВВЕДЕНИЕ

Современные технологии лечения пациентов со злокачественными новообразованиями неразрывно связаны с использованием высокотехнологичных медицинских приборов и систем, обеспечивающих надежность и воспроизводимость лечебного воздействия. В лучевой терапии эффективность определяется не только характеристиками ионизирующего излучения, но и точностью его пространственного распределения в сложных анатомических структурах. Внедрение динамических методов облучения потребовало высокой согласованности между системами визуализации, дозиметрического планирования и управления облучением. Подведение высоких доз к патологическим очагам с минимальным воздействием на здоровые ткани требует воспроизводимости всех этапов планирования и реализации облучения, однако стабильность параметров может нарушаться из-за технических, анатомических и временных факторов.

Одной из ключевых проблем, снижающих точность планирования и воспроизведения облучения, является дыхательная подвижность анатомических структур. В ПЭТ/КТ-исследованиях она приводит к искажению визуализируемого объема и границ целевого объема облучения. Существующие методы коррекции артефактов не обеспечивают универсального решения, что обуславливает необходимость создания моделей и технических средств, учитывающих трехмерную динамику движения очага и прогнозирующих геометрическую неопределенность.

Другой важной задачей остается повышение метрологической точности систем, применяемых в клинической практике. Проблемы недостаточной воспроизводимости калибровок, использование непроверенных детекторов и невозможность оперативного учета флуктуаций радиационного выхода линейного ускорителя электронов (ЛУЭ) требуют разработки специализированных измерительно-вычислительных комплексов, адаптированных к динамическим режимам терапии. В настоящем исследовании эти направления объединены в единую концепцию, обеспечивающую комплексный подход к повышению точности дозиметрического планирования и контроля в динамической лучевой терапии.

Таким образом, разработка методов и устройств, обеспечивающих достоверный контроль, воспроизводимость измерений и расширенные возможности верификации в условиях пространственно-временной модуляции облучения, является актуальной задачей, решение которой способствует повышению эффективности лечения, радиационной безопасности пациентов и практической реализуемости динамических технологий в клинической онкологии.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнялась на базе государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова» в рамках проектов международной технической помощи при участии МАГАТЭ:

BYE6012 «Улучшение гарантии качества в позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией», зарегистрированного Министерством экономики Республики Беларусь 17.10.2018, № 2/18/000930;

BYE6013 «Совершенствование передовых методов лучевой терапии, включая гарантии качества и контроль качества», зарегистрированного Министерством экономики Республики Беларусь 20.04.2020, № 2/20/001079.

Работа также связана с исследовательским проектом Е33046 «Потенциал внедрения электронного обучения для приобретения навыков контурирования в лучевой терапии с применением искусственного интеллекта», реализованным при поддержке МАГАТЭ и ESTRO.

Тема диссертационной работы соответствует приоритетным направлениям научно-технической и инновационной деятельности в Республике Беларусь на 2021–2025 гг., определенным Указом Президента Республики Беларусь от 7 мая 2020 г. № 156, в части «Биологические, медицинские, фармацевтические и химические технологии производства: диагностика, медицинская профилактика и лечение инфекционных и неинфекционных заболеваний, экспертиза качества медицинской помощи; медицинское оборудование». Кроме того, выполненное исследование отражает приоритетные направления научно-технической и инновационной деятельности на 2026–2030 гг., утвержденные Указом Президента Республики Беларусь от 1 апреля 2025 г. № 135, в частности в области «Цифровые технологии и искусственный интеллект» и «Биологические и медицинские технологии».

Цель, задачи, объект и предмет исследования

Цель исследования – установление зависимостей степени геометрических искажений визуализируемого объема патологических очагов на ПЭТ/КТ-изображениях внутренних органов пациента от амплитуды его дыхательной подвижности и от размеров указанных очагов и разработка с учетом установленных зависимостей математической модели и технических средств

дозиметрического обеспечения, оценки и контроля параметров планов облучения при динамической лучевой терапии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработать экспериментальную установку с физическим фантомом и электромеханической платформой, обеспечивающую воспроизводимое моделирование дыхательных смещений патологического очага с учетом анатомических особенностей пациента и распределения активности радиофармацевтического препарата.

2. Обосновать, разработать и реализовать математическую модель, предназначенную для количественной оценки визуализационных искажений на ПЭТ/КТ-изображениях, обусловленных дыхательной подвижностью пациента, и сформировать на ее основе программно-математический инструмент для оценки геометрической достоверности ПЭТ/КТ-визуализации подвижных анатомических структур.

3. Разработать и экспериментально обосновать измерительно-вычислительный комплекс со структурной избыточностью дозиметрического контроля, предназначенный для верификации планов облучения с учетом флуктуаций радиационного выхода линейного ускорителя электронов, с использованием фантомной измерительной среды и метрологически аттестованных средств регистрации дозы.

4. Разработать метод адаптивного пересчета кросс-калибровочного коэффициента с учетом флуктуаций радиационного выхода линейного ускорителя электронов и провести его экспериментальную верификацию на клинических дозиметрических планах с использованием разработанного измерительно-вычислительного комплекса, включая сопоставление результатов стандартной и адаптивной нормировки на основе гамма-анализа с различными критериями оценки ($3\% / 3$ мм, $2\% / 2$ мм, $2\% / 1$ мм).

Объект исследования: технические и методические средства обеспечения пространственно-дозовой точности при дозиметрическом планировании и реализации процедур динамической лучевой терапии, а также при проведении визуализации патологических очагов внутренних органов пациентов методами позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией, в условиях дыхательной подвижности анатомических структур.

Предмет исследования: принципы построения и алгоритмическая реализация технических решений, направленных на верификацию параметров дозиметрических планов облучения и количественную оценку визуализационных искажений на ПЭТ/КТ-изображениях, обусловленных дыхательной подвижностью, включая методы адаптивного нормирования, моделирования и метрологически обоснованного контроля.

Научная новизна

1. Впервые экспериментально установлены воспроизводимые количественные зависимости геометрических искажений ПЭТ/КТ изображений в условиях дыхательной подвижности пациента, полученные с применением разработанной системы, имитирующей дыхательные смещения патологических очагов его внутренних органов (амплитуда 6–24 мм, частота 12–20 циклов/мин, вариабельная метаболическая активность).

2. На основе полученных экспериментальных данных впервые разработана и верифицирована математическая модель дыхательных искажений ПЭТ/КТ-изображений патологических очагов внутренних органов пациентов, учитывающая пространственно-временную динамику дыхательной подвижности и специфику ПЭТ/КТ-визуализации указанных очагов.

3. Предложен метод адаптивного пересчета кросс-калибровочного коэффициента при верификации планов динамической лучевой терапии, основанный на регистрации дозы ионизирующего излучения с использованием структурно избыточной измерительной схемы и учете флюктуаций радиационного выхода линейного ускорителя и в отличие от существующих методов обеспечивающий метрологически прослеживаемое повышение точности нормировки (прирост γ -соответствия на 2,9–3,0 % при критерии 3 %/3 мм) и достоверности расчетно-измерительного сопоставления.

Положения, выносимые на защиту

1. С использованием разработанной экспериментальной системы, функционирующей в режиме дыхательной синхронизации и обеспечивающей воспроизведение контролируемых параметров движения, установлено, что при амплитуде дыхательной активности пациента 24 мм и диаметре патологического очага его внутренних органов 10 мм отклонение визуализируемого объема указанного очага на ПЭТ- и КТ-изображениях достигает соответственно 27 % и 52 %, что обуславливает необходимость учета индивидуальной дыхательной подвижности пациента при дозиметрическом планировании динамической лучевой терапии.

2. Математическая модель дыхательных искажений ПЭТ/КТ-изображений патологических очагов внутренних органов пациентов, отличающаяся трехмерной параметризацией характеристик движения указанных очагов, обеспечивающая воспроизводимое прогнозирование указанных искажений в условиях, приближенных к клиническим, при относительной погрешности $2,1 \pm 1,1 \%$, что в совокупности позволяет

обеспечить повышение точности дозиметрического планирования динамической лучевой терапии путем комплексного учета пространственно-временной динамики дыхательной подвижности и специфики визуализации, включая распределение радиофармпрепарата и параметры сегментации изображений.

3. Методика верификации дозиметрических планов динамической лучевой терапии, реализованная с использованием разработанного измерительно-вычислительного комплекса с адаптивным пересчетом кросс-калибровочного коэффициента, учитывающего флюктуации радиационного выхода ЛУЭ, обеспечивающая воспроизведимо высокие показатели γ -соответствия ($\geq 98,1\%$ при критерии $3\%/3$ мм и $\geq 94,9\%$ при $2\%/1$ мм), что подтверждено результатами ее клинической аprobации и свидетельствует о ее метрологической устойчивости для высокоточной верификации.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с ограничением их от соавторов совместных исследований и публикаций

Лично автором разработана экспериментальная установка, имитирующая дыхательные движения целевого объема, выполнены проектирование, сборка и экспериментальные исследования; разработана и верифицирована математическая модель дыхательных искажений ПЭТ/КТ-изображений и программный комплекс для моделирования и анализа результатов; предложен метод адаптивного пересчета кросс-калибровочного коэффициента и создан измерительно-вычислительный комплекс для верификации дозиметрических планов динамической лучевой терапии.

В отдельных этапах исследования совместно с автором принимали участие соавторы, выполнившие определенные задачи экспериментальной и аналитической части работы: техническая поддержка при разработке экспериментальной установки – Е. В. Емельяненко и П. А. Белобоков, М. Н. Жарун, обработка ПЭТ-изображений – В. В. Дарахвелидзе, анализ модельных данных – Д. В. Коровко, дозиметрические измерения – Е. В. Титович и А. А. Шиш, статистическая обработка результатов – А. И. Бринкевич. Определение цели и задач исследования проводились совместно с научным руководителем – д-м техн. наук, проф. И. Г. Тарутиным.

Все основные научные положения, выводы и практические результаты диссертации получены автором самостоятельно. Результаты, полученные соавторами публикаций, в диссертацию не вошли.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Республиканская научно-практическая конференция с международным участием «Актуальные вопросы диагностики и лечения онкологических заболеваний» (Минск, 2013); Международная конференция «Advances in Radiation Oncology» (Вена, 2017); Международная научная конференция «Actual Environmental Problems» (Минск, 2018); Международная научная конференция «Actual Environmental Problems» (Минск, 2019); Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2020» (Минск, 2020); Международная научная конференция «Сахаровские чтения 2022» (Минск, 2022); 2-я Международная научно-техническая конференция, посвященная 70-летию ИМИ-ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М. Т. Калашникова» «Актуальные проблемы науки и техники» (Ижевск, 2022); Международная конференция «Nucleus-2022: Fundamental Problems and Applications» (Саратов, 2022).

Использование результатов диссертации подтверждено актами их внедрения в клиническую практику и учебный процесс.

Опубликованность результатов диссертации

По результатам выполненных исследований опубликованы 24 научные работы общим объемом 9,9 авторского листа. Из них 5 статей объемом 4,1 авторского листа в научных изданиях, соответствующих пункту 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий, 4 статьи в других научных изданиях объемом 2,7 авторского листа, 7 статей в сборниках материалов конференций объемом 2,4 авторского листа, 6 статей в сборниках тезисов докладов конференций объемом 0,7 авторского листа; 2 патента на изобретения.

Структура и объем диссертации

Работа состоит из введения, общей характеристики работы, 4 глав, заключения, списка использованных источников, 7 приложений. Список использованных источников включает библиографический список из 90 наименований и список публикаций соискателя ученой степени из 24 наименований. Общий объем – 190 страниц, в том числе 38 рисунков на 18 страницах, 3 таблицы на 2 страницах, 7 приложений на 72 страницах.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В разделах диссертации «**Введение**» и «**Общая характеристика работы**» обоснована актуальность темы исследования, определены цель и задачи работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, приведены сведения об апробации и опубликовании основных результатов.

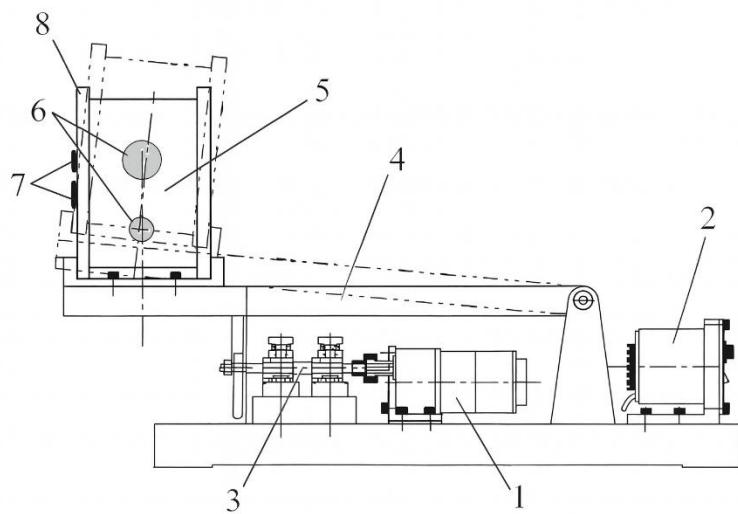
В **первой главе** представлен комплексный анализ современных методов и технических решений в области динамической лучевой терапии (ДЛТ), включая их физические и технологические основы. Рассмотрены особенности работы клинических систем дозиметрического планирования, алгоритмы расчета дозы ионизирующего излучения (ИИ), требования к точности пространственной доставки и вопросы метрологического обеспечения. Особое внимание уделено влиянию дыхательной подвижности на качество ПЭТ/КТ-визуализации и существующим подходам к ее учету, включая респираторные системы и фантомные модели. На основе анализа литературных источников определены характерные параметры движения патологического очага, что позволило обосновать подход к построению теоретической модели дыхательной подвижности. Приведен обзор средств верификации дозиметрических планов, методов γ -анализа и метрологических аспектов применения различных детекторных систем, что формирует научно-техническую базу для постановки задач, решаемых в последующих главах.

Глава 2 посвящена разработке и экспериментальной верификации системы моделирования дыхательных смещений патологического очага для оценки их влияния на точность визуализации и дозиметрического планирования в ДЛТ.

Разработана система, обеспечивающая воспроизведение заданных дыхательных смещений в вертикальном направлении с амплитудой 6–24 мм при частоте 12–20 циклов/мин.

В состав системы входит экспериментальная установка с движущимся фантомом с шестью сферическими вставками различного диаметра, что позволяет моделировать патологические очаги разных размеров. Установка синхронизируется с системой слежения за дыхательным движением *Respiratory Position Management (RPM)*, что обеспечивает высокую точность воспроизведения заданного движения и сопоставимость полученных данных с клиническими условиями.

Разработанная экспериментальная установка представлена на рисунке 1 и включает механический привод возвратно-поступательного движения, платформу с держателем фантома и систему управления.



1 – мотор-редуктор; 2 – регулятор скорости; 3 – вал с кулачком; 4 – подвижная платформа; 5 – фантом, 6 – сферические вставки; 7 – винты-заглушки; 8 – крышка

Рисунок 1 – Конструкция движущейся экспериментальной установки

В результате экспериментов установлены количественные зависимости:

- между амплитудой дыхательных смещений и величиной искажений, возникающих при ПЭТ/КТ-визуализации (рисунок 2), которые возрастают экспоненциально с увеличением амплитуды движения;
- между диаметром патологического очага и величиной искажений (рисунок 3), которые уменьшаются по мере увеличения размеров очага.

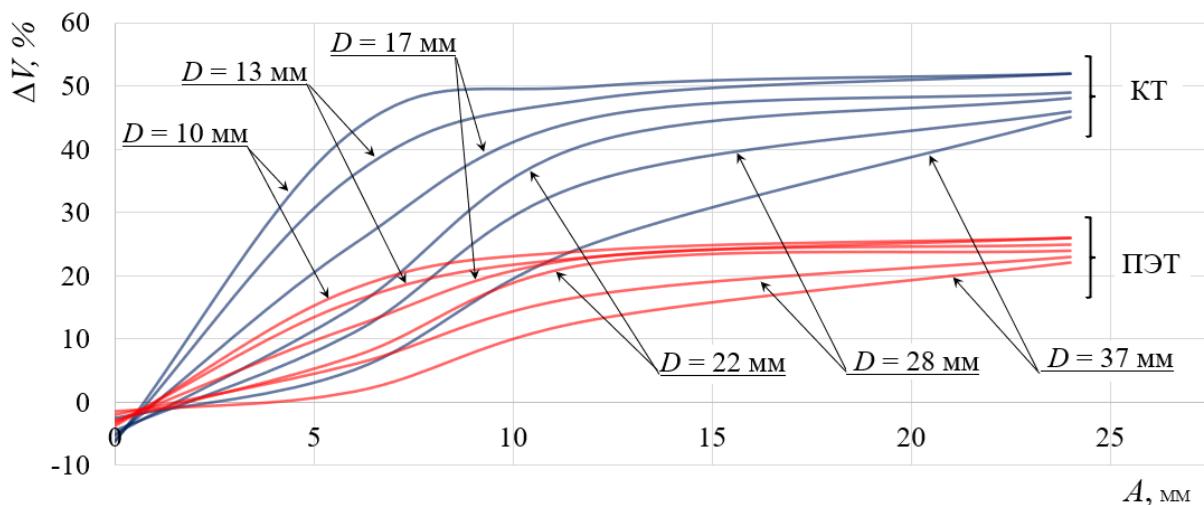


Рисунок 2 – Зависимость величины искажения визуализируемого объема от амплитуды дыхательного смещения для различных диаметров сферических вставок (D) при ПЭТ- и КТ-визуализации

Показано, что при амплитуде 24 мм и диаметре очага 10 мм искажения визуализируемого объема по данным КТ достигают 52 %, тогда как по данным

ПЭТ – не более 27 %. При этом с увеличением диаметра очага степень искажений снижается. Наибольшее влияние дыхательной подвижности отмечено для малых очагов при больших амплитудах смещений.

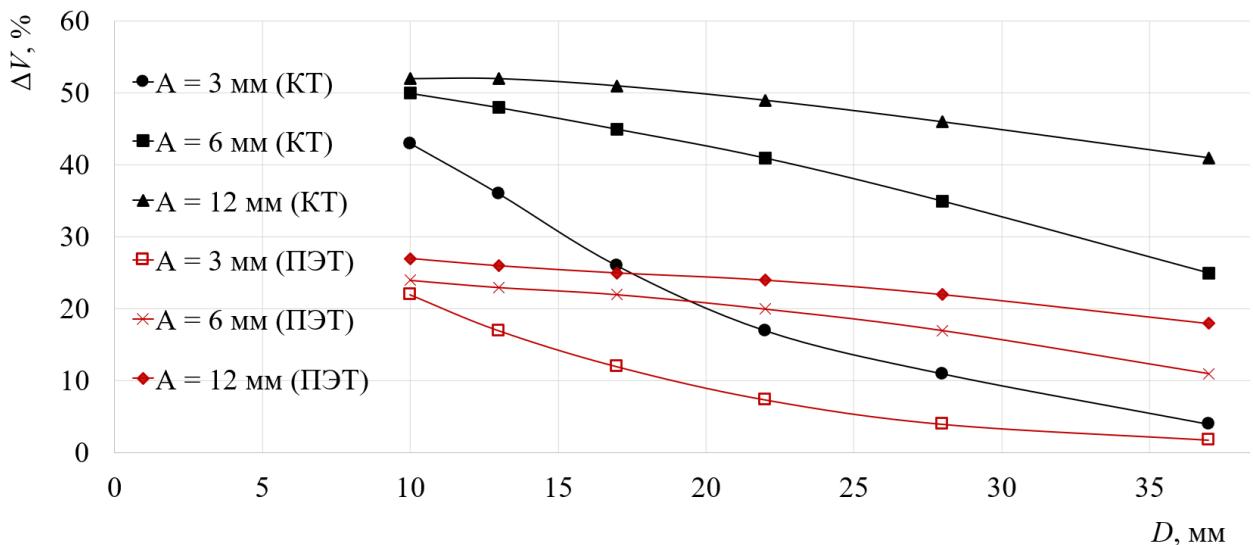


Рисунок 3 – Зависимость величины искажения визуализируемого объема от диаметра патологического очага

Результаты экспериментов легли в основу построения математической модели дыхательной подвижности, представленной в третьей главе, и использованы для определения параметров, применяемых при моделировании искажений ПЭТ/КТ-визуализации.

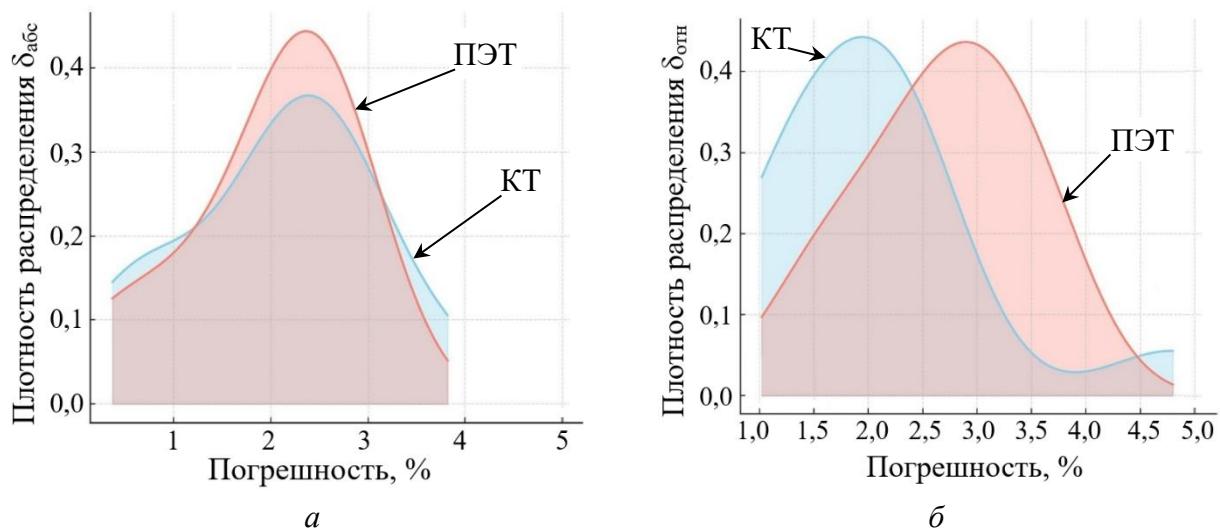
Глава 3 посвящена разработке и верификации трехмерной математической модели респираторных искажений при визуализации патологических очагов методами ПЭТ/КТ. Модель включает: модуль симуляции, обеспечивающий воспроизведение параметров дыхательных движений с учетом амплитудно-частотных характеристик; модуль визуализации и сегментации, позволяющий формировать объемные изображения с внесенными искажениями и выполнять выделение патологического очага; расчетный модуль, предназначенный для количественной оценки искажений визуализируемого объема и анализа согласованности с клиническими данными. В отличие от экспериментальной установки, представленной в главе 2 и воспроизводящей одномерные вертикальные смещения, новая модель учитывает смещения в трех взаимно перпендикулярных направлениях, что приближает условия моделирования к реальным траекториям движения очага в грудной клетке.

Разработка модели опирается на экспериментальные зависимости, полученные в главе 2, что позволило заложить в алгоритмы расчета взаимосвязь между амплитудой дыхательных смещений, размерами очага и особенностями пространственно-временного усреднения в изображениях.

Целью ее верификации являлось подтверждение воспроизводимости и точности прогнозирования величины искажений в условиях, максимально приближенных к клиническим, с учетом специфики алгоритмов реконструкции и временной интеграции данных ПЭТ/КТ.

Верификация разработанной модели проведена с использованием параметрического анализа и сопоставления с клиническими ПЭТ/КТ-исследованиями, что подтвердило максимальную погрешность прогноза не более $2,1 \pm 1,1\%$. Модель корректно воспроизводит зависимости величины искажений от амплитуды дыхательных смещений и размеров патологического очага, выявленные в экспериментальных исследованиях, и обеспечивает прогнозирование степени искажения визуализируемого объема с учетом распределения радиофармпрепарата и выбранных параметров сегментации изображений.

На рисунке 4, *а* представлена плотность распределения абсолютных погрешностей, а на рисунке 4, *б* относительных погрешностей для КТ- и ПЭТ-данных, полученных при сравнении расчетных данных модели с клиническими значениями. Анализ показал, что ПЭТ-визуализация обладает большей устойчивостью к дыхательным искажениям по сравнению с КТ, что связано с особенностями алгоритмов реконструкции и интеграции данных.



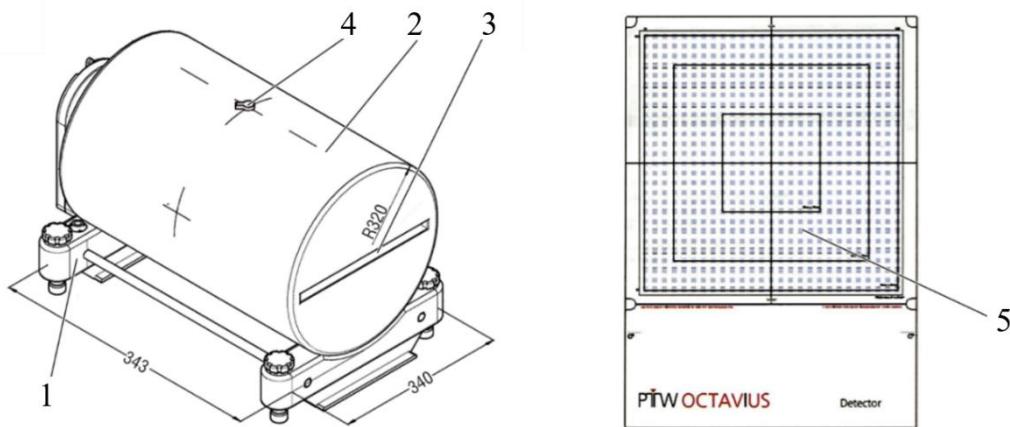
а – абсолютные погрешности; б – относительные погрешности

Рисунок 4 – Плотность распределения погрешностей для КТ и ПЭТ-данных

Разработанная трехмерная модель обеспечивает повышение точности дозиметрического планирования ДЛТ за счет комплексного учета пространственно-временной динамики дыхательной подвижности, особенностей ПЭТ/КТ-визуализации, распределения радиофармпрепарата и параметров сегментации изображений.

В четвертой главе представлен измерительно-вычислительный комплекс для верификации (оценки соответствия рассчитанных и измеренных дозовых распределений) дозиметрических планов ДЛТ с учетом флюктуаций радиационного выхода ЛУЭ. Разработка измерительно-вычислительного комплекса осуществлялась с соблюдением совокупности технических, метрологических и эксплуатационных требований, определенных особенностями клинической практики ДЛТ и действующими нормативными документами в области медицинской радиологии, что обеспечило его функциональную и информационную совместимость с существующей инфраструктурой радиотерапевтического отделения.

Разработанный комплекс включает водозэквивалентный цилиндрический фантом диаметром 320 мм и длиной 343 мм, два поверенных кремниевых диодных детектора *T60010M* в составе электрометрического считывателя *PTW DiodeMate*, матричный ионизационный детектор *PTW 1500*, а также модуль сбора и пересчета дозовых данных. Конструктивная особенность устройства заключается в структурной избыточности измерений, что, в сочетании с алгоритмом адаптивного учета флюктуаций радиационного выхода ЛУЭ обеспечивает повышение метрологической достоверности результатов. Фантом выступает в качестве измерительной среды, позволяющей проводить регистрацию дозы как в точечных (диодных) каналах, так и в распределенной матричной структуре. На рисунке 5 представлена конструктивная схема устройства.



1 – подставка; 2 – фантомное тело (водозэквивалентный фантом); 3 – отверстие для установки матричного ионизационного детектора; 4 – кремниевый диодный детектор (сверху); 5 – матричный детектор с ионизационными камерами

Рисунок 5 – Конструктивная схема устройства для верификации дозиметрических планов

Для обработки измеренных данных и их согласования с расчетными значениями разработана оригинальная формула кросс-калибровочного коэффициента, учитывающая данные диодных и матричных детекторов, а также текущие колебания радиационного выхода ЛУЭ:

$$k_{Cross} = \frac{1}{2} \left(\frac{2 \cdot D_{\text{КСПО}}}{M_{refDin} + k_{shD} M_{refDout}} + \frac{D_{\text{КСПО}}}{M_{refA} \cdot k_{shA}} \right),$$

где $D_{\text{КСПО}}$ – расчетное значение дозы ИИ, полученное в КСПО; $M_{refDin}, M_{refDout}$ – сигналы, зарегистрированные входным и выходным диодными детекторами; k_{shD} – коэффициент, учитывающий снижение интенсивности ионизирующего излучения при его прохождении через конструкционные элементы устройства перед регистрацией сигнала кремниевым диодным детектором; k_{shA} – коэффициент, учитывающий снижение интенсивности ионизирующего излучения при его прохождении через измерительную среду фантома до регистрации дозы ионизационными камерами матричного детектора; M_{refA} – сигнал центральной камеры ионизационного детектора.

На основе разработанного устройства сформирована методика верификации дозиметрических планов, включающая калибровку диодных детекторов, сбор и обработку данных, пересчет распределений с использованием кросс-калибровочного коэффициента, а также оценку соответствия расчетных и измеренных данных методом гамма-анализа.

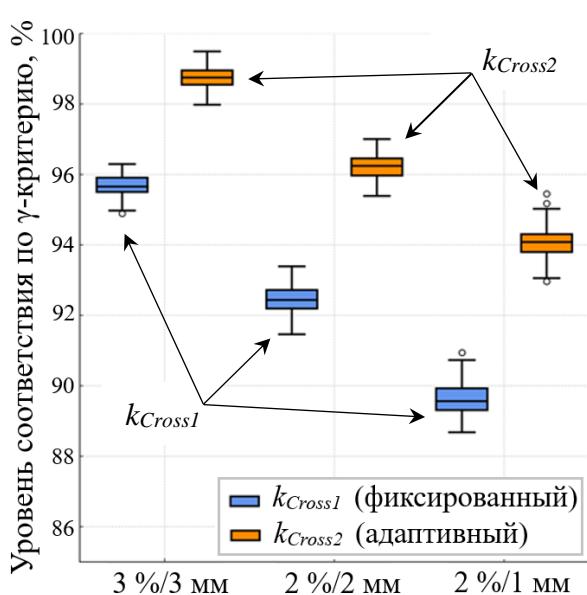


Рисунок 6 – Зависимость уровня γ-соответствия от критерия оценки для фиксированного и адаптивного методов нормировки

Экспериментальная проверка проведена на клинических планах облучения локализаций «предстательная железа», «молочная железа» и «головной мозг», построенных в КСПО *Eclipse* для ЛУЭ *TrueBeam STx*. Сравнение стандартного метода нормировки k_{Cross1} и предложенного адаптивного подхода k_{Cross2} показало, что применение разработанного комплекса обеспечило прирост прохождения гамма-анализа по критериям 3 %/3 мм на величину до 2,9 процентных пункта (п. п.), а также повышение стабильности результатов при ужесточении критериев (2 %/2 мм и 2 %/1 мм) до 5,4 п. п. (рисунок 6).

Разработанный измерительно-вычислительный комплекс в сочетании с методикой пересчета дозы обеспечивает повышение точности и метрологической воспроизводимости оценки дозиметрических планов ДЛТ, что подтверждает их эффективность и применимость в системах дозиметрического планирования и контроля качества лечебных процедур.

В **Приложении А** представлена инструкция по применению «Методы оценки характеристик лучевого лечения онкологических пациентов при планировании высокотехнологичного облучения».

В **Приложении Б** приведены акты внедрения результатов работы.

В **Приложении В** приведены патенты на изобретения.

В **Приложении Г** приведены удостоверения рационализаторских предложений.

В **Приложении Д** представлены конструкторские чертежи разработанной движущейся установки.

В **Приложении Е** изложены результаты математической обработки и параметрической интерпретации экспериментальных данных.

В **Приложении Ж** представлены исходные коды программных модулей и алгоритмов, разработанных в рамках диссертационного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-прикладная задача, заключающаяся в установлении закономерностей и количественных зависимостей степени геометрических искажений визуализируемого объема патологических очагов на ПЭТ/КТ-изображениях внутренних органов пациента от параметров дыхательной подвижности и размеров очага, а также в разработке математической модели и технических средств дозиметрического обеспечения параметров планов облучения при динамической лучевой терапии. На основе проведенных теоретических, численных и экспериментальных исследований построена и верифицирована трехмерная модель дыхательных искажений ПЭТ/КТ-визуализации, реализованы принципы учета дыхательной подвижности при дозиметрическом планировании, а также разработан измерительно-вычислительный комплекс с адаптивным пересчетом кросс-калибровочного коэффициента, учитывающий флуктуации радиационного выхода ЛУЭ. Полученные результаты обеспечивают повышение точности планирования и верификации динамической лучевой терапии, а также совершенствование процедур контроля качества облучения. Тем самым поставленная цель достигнута, а сформулированные в работе научные и технические задачи полностью решены.

Основные научные результаты диссертации

1. Разработана и реализована экспериментальная установка для воспроизведения дыхательной подвижности патологического очага внутренних органов пациента в условиях ПЭТ/КТ-визуализации, обеспечивающая реалистичное моделирование смещений в диапазоне амплитуд 6–24 мм и частот 12–20 циклов/мин. Конструкция включает механическую платформу возвратно поступательного действия с возможностью фазовой синхронизации, а также модульный фантом с шестью сферическими вставками диаметром от 10 до 37 мм, наполняемыми радиофармацевтическим препаратом для имитации метаболически активных патологических очагов. Такая конфигурация обеспечивает моделирование условий, приближенных к клинической визуализации патологического очага внутренних органов пациента с характерным фоном и метаболическим контрастом. Обеспечена совместимость установки с системой дыхательного мониторинга *RPM* и ПЭТ/КТ-установками, используемыми в клинической практике. Обеспечена методическая воспроизводимость визуализации патологических очагов в статических и динамических режимах, приближенных к реальным клиническим условиям [1–А; 2–А; 8–А; 12–А; 22–А; 24–А].

2. Экспериментально установлены количественные зависимости искажений визуализируемого объема патологического очага внутренних органов пациента от параметров дыхательного смещения и геометрических характеристик, подтвержденные статистическим анализом. При амплитуде $A = 24$ мм и диаметре $D = 10$ мм величина искажений составила до 52 % для КТ и до 27 % для ПЭТ, при этом ПЭТ-визуализация демонстрировала в среднем в два раза меньшую чувствительность к дыхательным смещениям по сравнению с КТ. Для интерпретации экспериментальных данных построена аппроксимирующая регрессионная модель, описывающая зависимость искажений от амплитуды и размеров патологического очага, с высокой степенью достоверности ($R^2 = 0,95$). Полученные результаты подтверждают объективные преимущества ПЭТ при оценке подвижных анатомических структур и обосновывают необходимость учета дыхательных смещений при пространственно-дозиметрическом планировании и верификации облучения [4–А; 5–А; 10–А; 19–А; 20–А].

3. Разработана и реализована математическая модель визуализационных искажений патологического очага на ПЭТ/КТ-изображениях, возникающих в условиях дыхательной подвижности, предназначенная для численного анализа влияния параметров движения на геометрическую достоверность визуализации. Формализация модели выполнена с учетом амплитуды дыхательного смещения (0–24 мм), размеров патологического очага (10–60 мм)

и трехмерной траектории движения с поправочными коэффициентами по направлениям. Модель реализована в виде программного комплекса в среде *MATLAB*, включающего модули симуляции движения, построения изображений, пороговой сегментации и расчета визуализационных искажений. Верификация на основе клинических ПЭТ/КТ-данных показала максимальное расхождение менее 5 % ($p > 0,05$), а статистический анализ выявил достоверные зависимости между параметрами движения и характером искажений ($r > 0,9$; $p < 0,001$). Разработанный программно-математический инструмент предназначен для интеграции в состав систем поддержки принятия решений при анализе ПЭТ/КТ-визуализации подвижных анатомических структур, обеспечивая количественную оценку и снижение неопределенности геометрических параметров, обусловленных дыхательной подвижностью [1–А; 5–А; 7–А; 8–А; 22–А].

4. Разработан измерительно-вычислительный комплекс для верификации дозиметрических планов динамической лучевой терапии, в конструкции которого реализована структурная избыточность дозиметрических измерений на основе поверенных диодных детекторов и матричного ионизационного детектора. Комплекс обеспечивает получение метрологически обоснованных данных с относительной погрешностью не более $\pm 1,0\%$ (при $k = 2$), превосходя по параметрам прослеживаемости и воспроизводимости существующие решения. На основе данного комплекса предложен метод адаптивного пересчета кросс-калибровочного коэффициента с учетом текущих флюктуаций радиационного выхода ЛУЭ, обеспечивающий повышение точности нормировки дозы ионизирующего излучения. Экспериментально подтвержден прирост среднего значения γ -соответствия ($\gamma \leq 1$) на 2,9–3,0 % при критериях 3 %/3 мм (порог 10 %) по сравнению со стандартным методом нормировки ($p < 0,01$) [3–А; 9–А; 14–А; 15–А; 16–А; 17–А; 18–А; 21–А; 23–А].

5. Разработана методика верификации дозиметрических планов динамической лучевой терапии, включающая адаптивный пересчет кросс-калибровочного коэффициента и последующую оценку результатов с применением γ -анализа при различных критериях (3 %/3 мм, 2 %/2 мм, 2 %/1 мм). Установлено, что применение адаптивного подхода обеспечивает сохранение высокой степени γ -соответствия при ужесточении условий анализа: при критерии 2 %/1 мм доля точек с $\gamma \leq 1$ составила от 93,7 % до 94,9 % в зависимости от анатомической локализации, тогда как при использовании фиксированного кросс-калибровочного коэффициента значения снижались до 88,2–89,6 %. Полученные результаты обеспечивают повышение метрологической устойчивости методики за счет снижения влияния локальных дозовых и геометрических вариаций, обусловленных флюктуациями радиационного выхода ЛУЭ и сложной анатомической конфигурацией зон облучения. Статистически достоверные различия между подходами ($p < 0,01$)

обосновывают возможность клинического применения ужесточенных критериев оценки при условии использования адаптивного подхода к нормировке дозы ионизирующего излучения [2–А; 6–А; 11–А; 13–А; 21–А].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Результаты диссертационной работы, включая технические средства контроля, математические модели и соответствующие методики, рекомендованы к использованию в следующих направлениях:

1. В **клинической практике** учреждений здравоохранения – в составе системы контроля качества динамической лучевой терапии, включающей методы верификации дозиметрических планов и способы оценки визуализационных искажений на ПЭТ/КТ-изображениях. Внедрение подтверждено соответствующими актами (приложения Б, Г).

2. В **учебном процессе** учреждений высшего образования медицинского и технического профиля, при подготовке специалистов в области медицинской физики, радиационной диагностики и ядерной медицины. Элементы разработанных устройств и методик внедрены в учебные и научно-исследовательские программы в качестве практико-ориентированных заданий и тематических модулей (приложение Б).

3. В **составе систем поддержки принятия клинических решений** при анализе ПЭТ/КТ-визуализации в условиях дыхательной подвижности анатомических структур. Разработанный программно-математический инструмент обеспечивает количественную оценку и снижение неопределенности геометрических параметров визуализируемых патологических очагов, обусловленных дыхательными смещениями (приложение Г).

Таким образом, разработанные технические решения и методики обладают высокой прикладной значимостью, подтвержденной внедрением в клиническую и образовательную практику, и могут служить технологической и методической основой для дальнейшего развития, стандартизации и практического применения систем контроля качества при проведении процедур динамической лучевой терапии.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных изданиях, соответствующих требованиям пункта 19 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий

1–А. 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 // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 4. – С. 496–504.

2–А. Петкевич, М. Н. Установление критериев γ -анализа индивидуальных дозовых распределений при проведении верификации планов облучения онкологических пациентов с применением методов высокотехнологичной лучевой терапии / М. Н. Петкевич, А. И. Бринкевич, Е. В. Титович // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 119–128.

3–А. Петкевич, М. Н. Аппаратная реализация верификации динамической лучевой терапии / М. Н. Петкевич, Е. В. Титович // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 2. – С. 239–249.

4–А. 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.

5–А. Петкевич, М. Н. Математическая модель респираторных искажений патологического очага при визуализации на ПЭТ/КТ-изображениях / М. Н. Петкевич, Д. В. Коровко, Е. В. Емельяненко // Доклады БГУИР. – 2025. – Т. 23, № 3. – С. 77–85.

Статьи в других научных изданиях

6–А. Титович, Е. В. Дозиметрическое планирование дистанционной лучевой терапии рака молочной железы с учетом анатомических параметров / Е. В. Титович, М. Н. Петкевич // Медицинская физика. – 2016. – № 4 (72). – С. 30–37.

7–А. Возможности ПЭТ/КТ в планировании высокотехнологичной лучевой терапии немелкоклеточного рака легкого / П. Д. Демешко, Р. А. Сакович, О. А. Барановский, В. В. Синайко, И. И. Минайло, А. К. Мерзлякова, М. Н. Петкевич // Онколог. журн. – 2017. – Т. 11, № 1 (41). – С. 97–102.

8–А. Емельяненко, Е. В. Контроль качества совмещения изображения в ПЭТ/КТ и анализ проблем гибридной визуализации при планировании лучевой терапии / Е. В. Емельяненко, М. Н. Петкевич // Вестн. НЯЦ РК. – 2020. – Вып. 1 (81). – С. 137–142.

9–А. Тарутин, И. Г. Новый подход к созданию протоколов качества оборудования для лучевой терапии / И. Г. Тарутин, М. Н. Петкевич // Медицинская физика. – 2022. – № 2. – С. 42–45.

Статьи в сборниках материалов научных конференций

10–А. Treatment plan stability to geometric uncertainties. PTV and CTV related dose-volume statistics comparison for 3D CRT, IMRT and VMAT irradiation of the «average» prostate patient in N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus / E. Titovich, M. Piatkevich // Advances in radiation oncology : international conf. , Vienna, 20–23 June 2017. – Р. 132.

11–А. Бринкевич, А. И. Критерии оценки дозиметрической верификации планов облучения в лучевой терапии с модуляцией интенсивности / А. И. Бринкевич, Е. В. Титович, М. Н. Петкевич // Сахаровские чтения 2020 года: экологические проблемы XXI века – Sakharov readings 2020: environmental problems of the XXI century : материалы 20-й междунар. науч. конф., Минск, 21–22 мая 2020 : 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 ф.-м.н., проф. С. А. Маскевича, к. т. н., доцента М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2020. – Ч. 2. – С. 33–36.

12–А. 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., Минск, 19–20 мая 2022 г. : 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 ф.-м.н., проф. С. А. Маскевича, к. т. н., доцента М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 223–226.

13–А. Бринкевич, А. И. Дозиметрическая верификация планов облучения в лучевой терапии с модуляцией интенсивности / А. И. Бринкевич, Т. С. Чикова, 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., Минск, 19–20 мая 2022 г. : 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 ф.-м.н., проф. С. А. Маскевича, к. т. н., доцента М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 226–229.

14—А. Чиркова, И. Н. Матричные детекторы ионизирующего излучения, применяемые в лучевой терапии / И. Н. Чиркова, М. Н. Петкевич, Т. С. Чикова // Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века – Sakharov readings 2022: environmental problems of the XXI century : материалы 22-й междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2022 г. : 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 ф.-м.н., проф. С. А. Маскевича, к. т. н., доцента М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 230–233.

15—А. Петкевич, М. Н. Обзор современных методов абсолютной дозиметрии / М. Н. Петкевич, И. Н. Чиркова, Т. С. Чикова // Сахаровские чтения 2022 года: экологические проблемы XXI века – Sakharov readings 2022: environmental problems of the XXI century : материалы 22-й междунар. науч. конф., Минск, 19–20 мая 2022 г. : 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 ф.-м.н., проф. С. А. Маскевича, к. т. н., доцента М. Г. Герменчук. – Минск : ИВЦ Минфина, 2022. – Ч. 2. – С. 233–236.

16—А. Чиркова, И. Н. Измерение ионизирующего излучения при помощи матричных детекторов / И. Н. Чиркова, М. Н. Петкевич, Т. С. Чикова // Актуальные проблемы науки и техники : материалы II междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 70-летию ИМИ–ИжГТУ и 60-летию СПИ (филиал) ФГБОУ ВО «ИжГТУ имени М.Т. Калашникова», Ижевск, 19–21 мая 2022 г. – С. 574–578.

Статьи в сборниках тезисов докладов научных конференций

17—А. Контроль качества компьютерных систем планирования дистанционного облучения / М. Н. Петкевич, Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, А. А. Жигун // Актуальные вопросы диагностики и лечения онкологических заболеваний : материалы Респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием. – 2013. – Онколог. журн. – Т. 7, № 4. – С. 44.

18—A. A method for IMRT treatments of prostate cancer improvement / M. Piatkevich, E. Titovich, N. Makarava, D. Kazlouski, A. Kaprusynka, V. Hertsyk // Actual Environmental Problems : proceedings of the VIII International scientific conference of young scientists, graduates, master and PhD students, Minsk, 22–23 November 2018 / ISEI BSU ; ed. S. A. Maskevitch, S. S. Poznjak. – Minsk, 2018. – Р. 64–65.

19—A. Analysis of criteria for evaluating the dose to the heart during radiation therapy treatment planning for breast tumors using respiratory gating / M. Mayorava, E. Titovich, M. Piatkevich, A. Kaprusynka, V. Loika, N. Makarava // Actual

Environmental Problems : proceedings of the IX International scientific conference for young scientists, graduates, master and PhD students, Minsk, 21–22 November 2019 / ISEI BSU ; ed. S. A. Maskevitch, N. A. Lysukha. – Minsk, 2019. – P. 98–99.

20–A. Development of methodical recommendations regulating the selection of external beam radiation therapy technique and parameters of treatment planning / M. Piatkevich, N. Makarava, E. Titovich, V. Malishevskiy, M. Mayorava // Actual Environmental Problems : proceedings of the IX International scientific conference for young scientists, graduates, master and PhD students, Minsk, 21–22 November 2019 / ISEI BSU ; ed. S. A. Maskevitch, N. A. Lysukha. – Minsk, 2019. – P. 198–199.

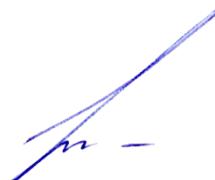
21–A. Piatkevich, M. N. Verification phantoms for dynamic radiotherapy plans / M. N. Piatkevich, I. G. Tarutin // Nucleus-2022: fundamental problems and applications : book of abstracts LXXII International conf., Moscow, 11–16 July 2022 ; ed. K. A. Stopani, N. S. Zelenskaya. – Saratov : Amirit, 2022. – P. 369.

22–A. The method for visualization quality assessing for the objects in positron emission tomography images / E. V. Emelianenko, M. N. Petkevich, I. G. Tarutin // Nucleus–2022: fundamental problems and applications : book of abstracts LXXII international conf., Moscow, 11–16 July 2022 ; ed. K. A. Stopani, N. S. Zelenskaya. – Saratov : Amirit, 2022. – P. 372.

Патенты

23–A. Патент BY 23659, МПК A61N 5/10 (2006.01). Устройство для проведения верификации плана облучения пациента при лучевой терапии : № а 20200286 : заявлено 19.10.2020 : опубл. 28.02.2022 / Петкевич М. Н., Титович Е. В., Шиш А. А. ; заявитель Государственное учреждение «Респ. науч.-практ. центр онкологии и мед. радиологии им. Н. Н. Александрова». – URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&target=23659&page=3&target=42978> (дата обращения: 22.10.2025).

24–A. Патент BY 23834, МПК A61B 6/00 (2006.01). Способ оценки качества изображения позитронно-эмиссионного томографа (ПЭТ) при сканировании движущейся биологической модели : № а 20200331 : заявлено 26.11.2020 : опубл. 30.10.2022 / Емельяненко Е. В., Петкевич М. Н., Белобоков П. А. ; заявитель Государственное учреждение «Респ. науч.-практ. центр онкологии и мед. радиологии им. Н. Н. Александрова». – URL: <https://search.ncip.by/database/index.php?pref=inv&lng=ru&target=23834&page=3&target=43029> (дата обращения: 22.10.2025).



РЭЗЮМЭ

Пяткевіч Максім Мікалаевіч

Тэхнічныя сродкі кантролю і ацэнкі параметраў індывідуальных планаў дынамічнай прамянёвой тэрапіі

Ключавыя слова: дынамічная прамяневая тэрапія, дазіметрычнае планаванне, верыфікацыя, дыхальная мабільнасць, лінейны паскаральнік, кантроль якасці, гама-аналіз, ПЭТ/КТ-візуалізацыя

Мэта працы: вызначэнне залежнасцей ступені геаметрычных скажэнняў візуалізаванага аб'ему паталагічных ачагоў на ПЭТ/КТ-выявах унутраных органаў пацыента ад амплітуды яго дыхальнай рухомасці і памераў указанных ачагоў, а таксама распрацоўка матэматычнай мадэлі, распрацоўка і аргументаванне тэхнічных сродкаў дазіметрычнага забеспячэння, ацэнкі і кантролю параметраў планаў апрамянення пры дынамічнай прамяневай тэрапіі з выкарыстаннем выяўленых залежнасцей.

Метады даследавання: даследаванне ўключала эксперыментальнае мадэляванне дыхальнай рухомасці, ПЭТ/КТ-сканіраванне фантомаў, планаванне і апрамяненне на лінейным паскаральніку, вымярэнне дозы і лікавы аналіз размеркаванняў у сістэме дазіметрычнага планавання.

Выкарыстаная апаратура: ПЭТ/КТ-томографы *Discovery IQ* и *Discovery 710*, сістэма дыхальнай сінхранізацыі *RPM*, сістэма планавання апрамянення *Eclipse*, паскаральнік *TrueBeam STx*, фантом *Octavius 4D*, матрычныя і дыедныя дэтэктары, счытвальнік *DiodeMate*, дазіметр *MULTIDOS*, праграмныя пакеты *VeriSoft*, *MATLAB*, *Python*.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: у ходзе працы распрацавана эксперыментальная ўстаноўка, якая імітуе дыхальныя зрухі паталагічнага ачага з рэгуляваннем амплітуды і частаты, што дазволіла вызначыць залежнасці скажэнняў ПЭТ/КТ-візуалізацыі ад амплітуды і памераў ачага. На аснове атрыманых даных пабудавана і верыфікавана трохмерная матэматычная мадэль рэспіраторных скажэнняў ПЭТ/КТ-візуалізацыі з модулямі сімуляцыі, візуалізацыі і разліковым блокам; максімальная памылка прагнозу не перавышае 2,1 %. Створаны вымяральна-вылічальны комплекс з методыкай адаптыўнага пераразліку крос-калібровачнага каэфіцыента, якая ўлічвае флюктуацыі радыяцыйнага выхаду ЛУЭ і забяспечвае павышэнне дакладнасці верыфікацыі планаў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: вынікі работы ўкаранены ў практику анкалагічных устаноў Рэспублікі Беларусь.

Вобласць ужывання: прамяневая тэрапія.

РЕЗЮМЕ

Петкович Максим Николаевич

Технические средства контроля и оценки параметров индивидуальных планов динамической лучевой терапии

Ключевые слова: динамическая лучевая терапия, дозиметрическое планирование, верификация, дыхательная подвижность, линейный ускоритель, контроль качества, гамма-анализ, ПЭТ/КТ-визуализация

Цель работы: установление зависимостей степени геометрических искажений визуализируемого объема патологических очагов на ПЭТ/КТ-изображениях внутренних органов пациента от амплитуды его дыхательной подвижности и размеров указанных очагов и разработка математической модели, а также разработка и обоснование технических средств дозиметрического обеспечения, оценки и контроля параметров планов облучения при динамической лучевой терапии с использованием выявленных зависимостей.

Методы исследования: исследование включало экспериментальное моделирование дыхательной подвижности, ПЭТ/КТ-сканирование фантомов, планирование и облучение на линейном ускорителе, измерение дозы и численный анализ распределений в системе дозиметрического планирования.

Использованная аппаратура: ПЭТ/КТ-томографы *Discovery IQ* и *Discovery 710*, система дыхательной синхронизации *RPM*, система планирования облучения *Eclipse*, ускоритель *TrueBeam STx*, фантом *Octavius 4D*, матричные и диодные детекторы, считыватель *DiodeMate*, дозиметр *MULTIDOS*, программные пакеты *VeriSoft*, *MATLAB*, *Python*.

Полученные результаты и их новизна: разработана экспериментальная установка, имитирующая дыхательные смещения патологического очага с регулируемыми параметрами амплитуды и частоты, что позволило определить зависимости искажений ПЭТ/КТ-визуализации от амплитуды и размеров очага. На основе полученных данных построена и верифицирована трехмерная математическая модель респираторных искажений ПЭТ/КТ-визуализации с модулями симуляции, визуализации и расчетным блоком; максимальная погрешность прогноза не превышает 2,1 %. Создан измерительно-вычислительный комплекс с методикой адаптивного пересчета кросс-калибровочного коэффициента, учитывающей флуктуации радиационного выхода ЛУЭ и обеспечивающей повышение точности верификации планов.

Рекомендации по использованию: результаты работы внедрены в практику онкологических учреждений Республики Беларусь.

Область применения: лучевая терапия.

SUMMARY

Piatkevich Maksim Mikalaevich

Technical means for monitoring and evaluation of parameters of individual dynamic radiation therapy treatment plans

Keywords: dynamic radiation therapy, dosimetric planning, verification, respiratory motion, linear accelerator, quality assurance, gamma analysis, PET/CT imaging

Purpose of the work: establishment of the dependencies between the degree of geometric distortions of the visualized volume of pathological lesions on PET/CT images of the patient's internal organs and the amplitude of their respiratory motion and lesion size, as well as the development of a mathematical model and the design and justification of technical means for dosimetric support, assessment, and control of irradiation plan parameters in dynamic radiotherapy using the identified dependencies.

Research methods: the study included experimental simulation of respiratory motion, PET/CT phantom scanning, treatment planning and irradiation on a linear accelerator, dose measurement, and numerical analysis of dose distributions within the treatment planning system.

Used equipment: PET/CT scanners *Discovery IQ* and *Discovery 710*, respiratory gating system *RPM*, treatment planning system *Eclipse*, linear accelerator *TrueBeam STx*, phantom *Octavius 4D*, matrix and diode detectors, *DiodeMate* electrometer, *MULTIDOS* dosimeter, and software packages *VeriSoft*, *MATLAB*, *Python*.

The results obtained and their novelty: an experimental setup was developed to simulate respiratory-induced displacements of a pathological lesion with adjustable amplitude and frequency parameters, which made it possible to determine the dependencies of PET/CT visualization distortions on the amplitude and size of the lesion. Based on the obtained data, a three-dimensional mathematical model of respiratory distortions in PET/CT visualization was constructed and verified, including modules for simulation, visualization, and calculation; the maximum prediction error did not exceed 2,1 %. A measuremen-computational complex was created, incorporating a method for adaptive recalculation of the cross-calibration coefficient that accounts for fluctuations in the radiation output of the linear accelerator, thereby improving the accuracy of plan verification.

Recommendations for use: the results of the work have been implemented in the clinical practice of oncology institutions of the Republic of Belarus.

Scope: radiation therapy.

Научное издание

**Петкевич
Максим Николаевич**

**ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ И ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ПЛАНОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ
ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.11.17 – приборы, системы и изделия медицинского
назначения**

Подписано в печать 15.01.2026. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Опечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 60. Заказ 9.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,
«2/113 от 07.04.2014, №3/615 от 07.04.2014.
Ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск.