

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 Беларуси»

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

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 неупреждающих 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:

ВУЕ6012 «Улучшение гарантии качества в позитронно-эмиссионной томографии, совмещенной с компьютерной томографией», зарегистрированного Министерством экономики Республики Беларусь 17.10.2018, № 2/18/000930;

ВУЕ6013 «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, переменная 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 флуктуаций 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 флуктуации радиационного выхода ЛУЭ, обеспечивающая воспроизводимо 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 апробации и свидетельствует о ее метрологической устойчивости для высокоточной верификации.

Личный вклад соискателя ученой степени в результаты диссертации с отграничением 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, выполнявшие 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.

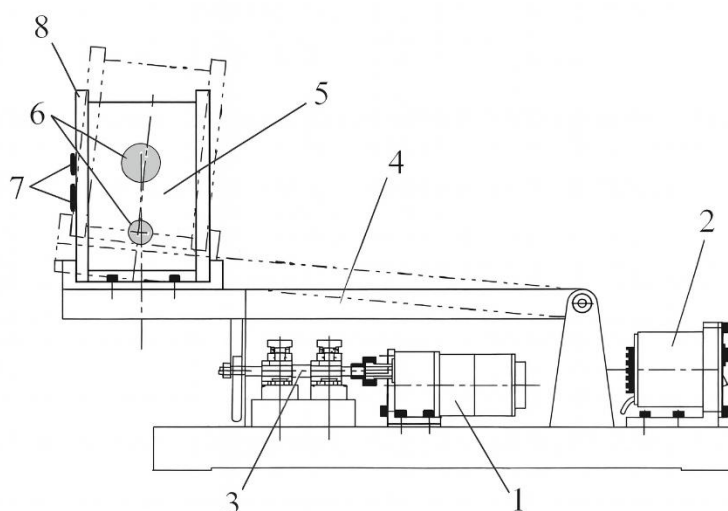
В первой главе представлен комплексный анализ современных методов и технических решений в области динамической лучевой терапии (ДЛТ), включая их физические и технологические основы. Рассмотрены особенности работы клинических систем дозиметрического планирования, алгоритмы расчета дозы ионизирующего излучения (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.

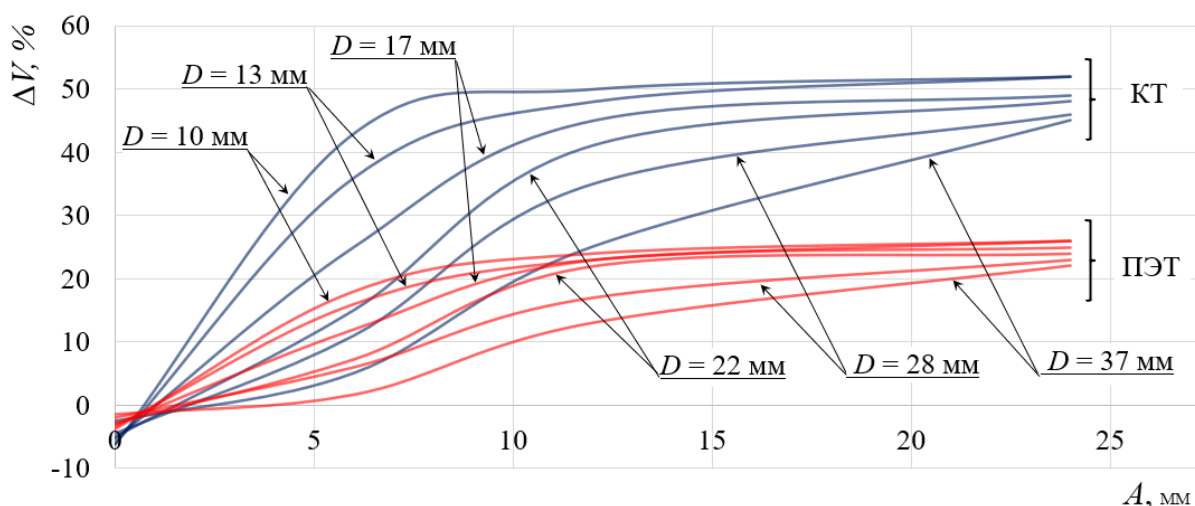


Рисунок 2 – Зависимость величины искажения визуализируемого объема от амплитуды дыхательного смещения для различных диаметров сферических вставок (D) при ПЭТ- и КТ-визуализации

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.

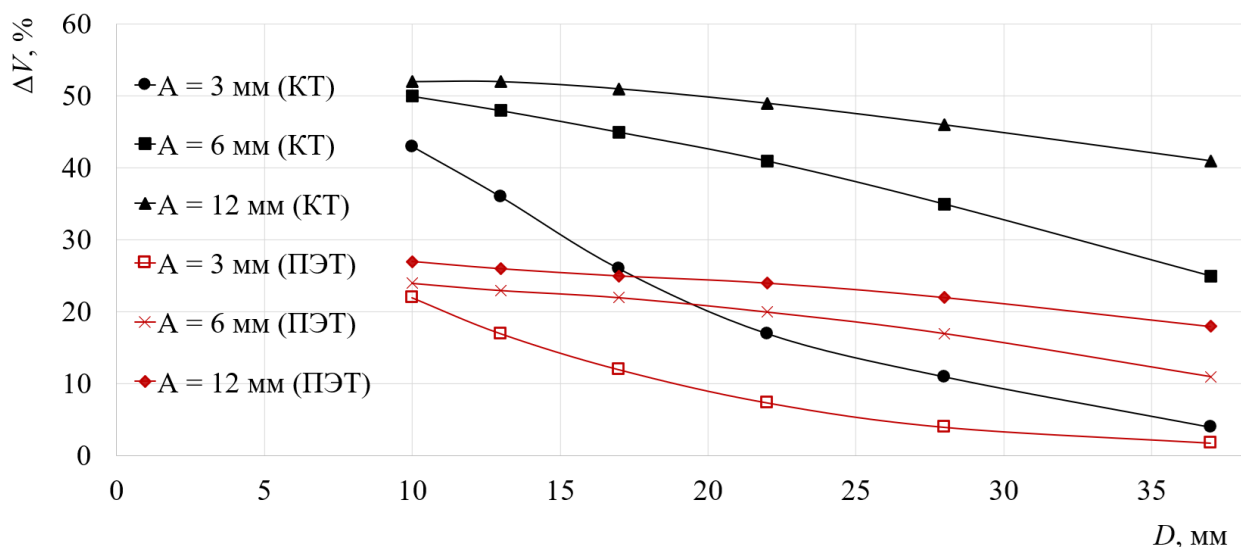


Рисунок 3 – Зависимость величины искажения визуализируемого объема от диаметра патологического очага

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.

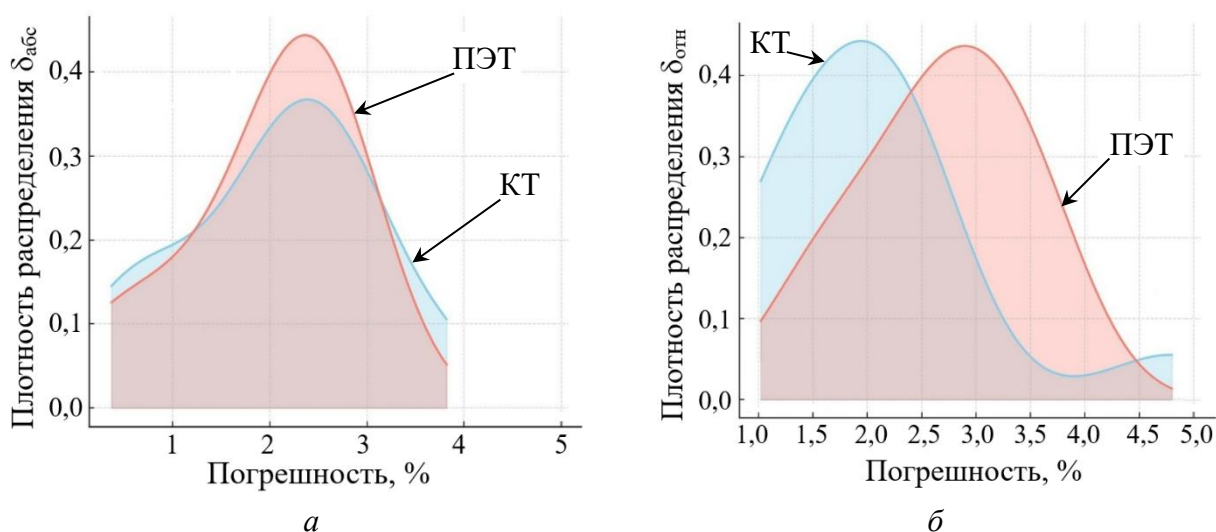
Глава 3 посвящена разработке и верификации трехмерной математической модели респираторных искажений при визуализации патологических очагов методами ПЭТ/КТ. Модель включает: модуль симуляции, обеспечивающий воспроизведение параметров дыхательных движений с учетом амплитудно-частотных характеристик; модуль 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.



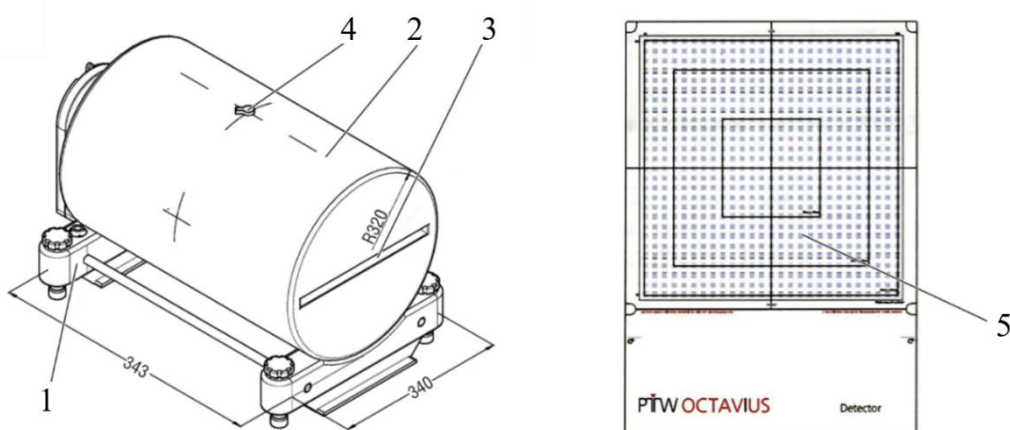
а – абсолютные погрешности; б – относительные погрешности

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 флуктуаций 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 флуктуаций 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:

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

где $D_{КСПО}$ – 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.

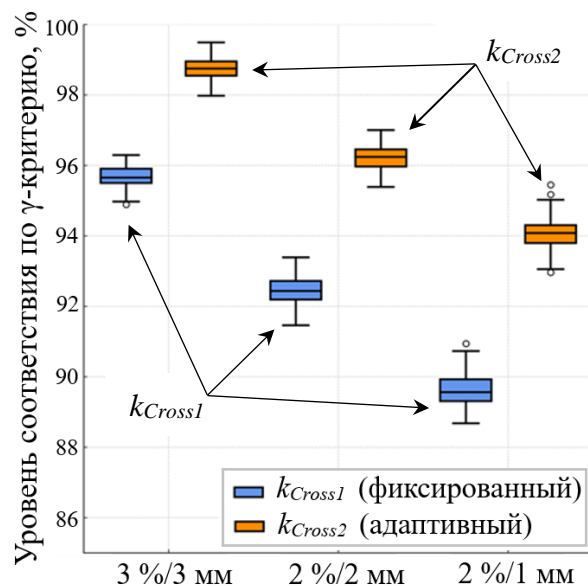


Рисунок 6 – Зависимость уровня γ -соответствия от критерия оценки для фиксированного и адаптивного методов нормировки

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 флуктуаций 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 флуктуациями 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. наук 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. наук 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. наук 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. – P. 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–А. 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. – P. 64–65.

19–А. 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–А. 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–А. 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–А. 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–А. Патент ВУ 23659, МПК А61N 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–А. Патент ВУ 23834, МПК А61В 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).



РЭЗІЮМЭ

Пяткевіч Максім Мікалаевіч

Тэхнічныя сродкі кантролю і ацэнкі параметраў індывідуальных планаў дынамічнай прамянёвай тэрапіі

Ключавыя словы: 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'ёму паталагічных ачагоў на ПЭТ/КТ-выявах унутраных органаў пацыента ад амплітуды яго дыхальнай рухомасці і памераў указаных ачагоў, а таксама распрацоўка матэматычнай мадэлі, распрацоўка і абгрунтаванне 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* і *Discovery 710*, сістэма дыхальнай сінхранізацыі *RPM*, сістэма планавання апрамянення *Eclipse*, паскаральнік *TrueBeam STx*, фантом *Octavius 4D*, матрычныя і дыядныя 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 метадыкай адаптыўнага пераразліку крос-калібровачнага каэфіцыента, якая ўлічвае флуктуацыі радыяцыйнага выхаду ЛУЭ і забяспечвае павышэнне дакладнасці верыфікацыі планаў.

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

Вобласць ужывання: прамяневая тэрапія.

РЕЗЮМЕ

Петкевич 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 measurement-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.