

Учреждение образования
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

УДК [621.384.64:539.1.089.6]: 615.849.1

ТИТОВИЧ
Егор Владимирович

**МЕТОДИКА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ
ПЛАНИРУЕМЫХ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ
ОБЛУЧЕНИИ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения

Минск 2016

Научная работа выполнена в учреждении образования «Белорусский национальный технический университет» и государственном учреждении «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александра».

Научные руководители: **Киселев Михаил Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и производства приборов учреждения образования «Белорусский национальный технический университет»

Тарутин Игорь Германович, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник отдела лучевой и комплексной терапии государственного учреждения «Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александра»

Официальные оппоненты: **Линев Владимир Николаевич**, доктор технических наук, профессор, генеральный директор научно-производственного частного унитарного предприятия «Адани»

Насонова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Оппонирующая организация Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета

Защита состоится «24» ноября 2016 г. в 14.00 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. (8-017) 293-89-89, e-mail: dissovet@bsuir.by.

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

Автореферат разослан «24» октября 2016 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук, доцент

Н.В. Насонова

КРАТКОЕ ВВЕДЕНИЕ

Лучевая терапия является одним из ведущих методов лечения больных с онкологическими заболеваниями и эффективна более чем у 50 % пациентов. Главным требованием к радиационной защите пациентов является максимально возможное снижение дозы на нормальные ткани и органы, окружающие опухоль, при высоких значениях дозы в ней. Эффективность облучения зависит от многих факторов, но определяющую роль играет внедрение и строгое выполнение системы мероприятий, направленных на соблюдение технологического процесса лучевой терапии, наиболее важной составляющей которой является контроль качества характеристик оборудования для облучения.

В этой связи в 1996 г. МАГАТЭ в международном стандарте по защите от ионизирующего излучения BSS No.115 с целью снижения вероятности возникновения радиационных аварий в лучевой терапии декларировало принцип «defense in depth», в русскоязычном варианте «глубокоэшелонированная защита»: «Необходимо применение более чем одной защитной системы для обеспечения радиационной безопасности так, чтобы безопасность была достигнута даже в случае отказа одной из систем».

В настоящее время преобладающим подходом при оценке работы медицинских линейных ускорителей является прямое сопоставление результатов измерений их технико-дозиметрических характеристик с опорными значениями, установленными во время ввода оборудования в эксплуатацию. Однако данный подход имеет ряд недостатков: не учитывает влияние параметров радиационного пучка на индивидуальные планируемые дозовые распределения; использует для оценки недозовые величины; не учитывает анатомию пациента и опухоли. Кроме того, известные программы контроля качества медицинских линейных ускорителей противоречат друг другу в отношении контролируемых характеристик, частоты их проверок и предельно допустимых отклонений, не предусматривают проведение верификации условий облучения и независимого контроля условий облучения и расчета доз.

В этой связи исследования, направленные на разработку эффективной системы контроля качества функционирования медицинских ускорителей электронов для облучения онкологических пациентов, обеспечивающей повышение их радиационной защиты при динамическом облучении, представляют собой актуальные научно-практические задачи, имеющие важное значение для онкологических учреждений.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Работа выполнялась в рамках тем Государственной научно-технической программы «Новые технологии диагностики, лечения и профилактики», подпрограмма «Онкология»: «Разработать и внедрить метод комплексного лечения пациентов, страдающих раком предстательной железы I–III стадии с неблагоприятным прогнозом, с использованием сочетанной лучевой терапии», № ГР 20141367 от 1 июля 2014 г., 2014–2018 гг.; «Разработать и внедрить методологию обеспечения качества лучевой терапии онкологических пациентов при использовании высокотехнологичных методик облучения», № ГР 20132067 от 2 октября 2013 г., 2013–2015 гг.

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям научно-технической деятельности в Республике Беларусь на 2016–2020 гг. (Указ Президента Республики Беларусь от 22.04.2015 № 166, раздел 4 «Медицина, фармацевтика, медицинская техника: технологии профилактики, диагностики и лечения заболеваний»).

Цель и задачи исследования

Целью диссертационной работы является установление закономерностей между технико-дозиметрическими характеристиками линейных ускорителей электронов и индивидуальными распределениями дозы при динамическом облучении и разработка базирующейся на них эффективной системы контроля качества функционирования медицинских ускорителей, обеспечивающей повышение радиационной защиты онкологических пациентов.

Для достижения поставленной цели потребовалось решить следующие задачи:

1. Разработать методики регистрации дозиметрических параметров радиационных пучков фотонов и многолепестковых коллиматоров медицинских линейных ускорителей для динамического облучения.

2. Установить зависимости между технико-дозиметрическими характеристиками медицинского линейного ускорителя, а также параметрами радиационных пучков и ошибками в определении опорного значения дозы при калибровке его радиационного выхода и разработать способ определения интегральной ошибки в дозе при калибровке радиационного выхода медицинского линейного ускорителя.

3. Исследовать влияние технико-дозиметрических характеристик медицинского линейного ускорителя на ошибки в плоскостных индивидуальных

распределениях дозы, доставляемых онкологическим пациентам при динамическом облучении, с учетом условий лучевого лечения, параметров радиационного пучка, особенностей пациентов и опухолей.

4. Предложить методики и создать аппаратные средства отпуска планируемых индивидуальных распределений дозы пациентам при динамическом облучении, а также разработать систему контроля качества функционирования медицинских линейных ускорителей электронов для динамического облучения онкологических пациентов, обеспечивающую повышение их радиационной защиты при реализации индивидуальных распределений дозы, провести их апробацию и внедрить результаты исследований в клиническую практику онкологических учреждений.

Научная новизна

1. Установлен характер зависимостей между технико-дозиметрическими характеристиками медицинского линейного ускорителя при облучении фотонами с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ, а также параметрами его радиационного пучка и ошибками в определении опорного значения дозы при калибровке радиационного выхода ускорителя и создана модель условий калибровки в компьютерной системе Eclipse, с помощью которых разработан способ определения интегральной ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода ускорителя, позволяющий путем сравнения ее значения с предельно допустимым отклонением определять возможность клинического использования данного ускорителя для проведения лучевой терапии.

2. Предложено и обосновано создание виртуальных фантомов со средними значениями оказывающих влияние на индивидуальные планируемые распределения дозы анатомических параметров пациентов с локализациями опухолевых очагов, которые наиболее часто подвергались облучению в РНПЦ ОМР в период с 2005 по 2015 г., что позволило оценить влияние технико-дозиметрических характеристик ускорителя и его радиационного пучка на индивидуальные плоскостные распределения дозы и разработать эффективную систему контроля качества функционирования медицинского линейного ускорителя в лучевой терапии, обеспечивающую повышение радиационной защиты пациентов путем дополнительной оценки целесообразности клинической эксплуатации используемого для их облучения ускорителя по результатам анализа планируемых плоскостных индивидуальных распределений дозы с учетом условий лучевого лечения.

3. Предложен интегральный кросс-калибровочный коэффициент распределения дозы в лучевой терапии и обоснован способ его определения, основанный на однократном измерении дозы и учитывающий физические

свойства используемой дозиметрической системы, параметры радиационного пучка, а также положение излучателя.

Положения, выносимые на защиту

1. Методики регистрации дозиметрических характеристик радиационных пучков фотонов и многолепестковых коллиматоров медицинских ускорителей, позволившие определить трехмерное распределение поглощенной дозы для всех клинических режимов работы ускорителя в гомогенном фантоме с плотностью вещества 1 г/см^2 и диапазоном перемещений измерительного детектора $500 \times 500 \times 400 \text{ мм}^3$ и осуществить конфигурацию алгоритма расчета дозы фотонов с энергиями 6 и 18 МэВ для моделирования дозиметрической системы при калибровке радиационного выхода ускорителя и динамическом облучении больных с использованием планируемых индивидуальных распределений дозы.

2. Установленные зависимости между технико-дозиметрическими характеристиками медицинского ускорителя, а также параметрами радиационного пучка, оказывающими влияние на дозу при облучении фотонами с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ, и ошибками в определении опорного значения поглощенной дозы при калибровке радиационного выхода ускорителя, а также разработанный с использованием установленных зависимостей и модели условий калибровки (гомогенный фантом с плотностью вещества 1 г/см^2 и размерами $300 \times 300 \times 300 \text{ мм}^3$) способ определения интегральной ошибки в дозе, позволяющий на основании полученных результатов калибровки оценить целесообразность клинического использования ускорителя путем сравнения интегральной ошибки в дозе с предельно допустимым отклонением 2 %.

3. Результаты исследований влияния технико-дозиметрических характеристик медицинского линейного ускорителя и его радиационного пучка на ошибки в планируемых индивидуальных распределениях дозы и разработанная с их использованием методика комплексной оценки ошибок в плоскостных дозовых распределениях, учитывающая индивидуальные параметры пациентов и их опухолевых очагов, и базирующаяся на ней эффективная система контроля качества функционирования медицинских линейных ускорителей, позволившие осуществить повышение радиационной защиты пациентов на основании анализа их планируемых индивидуальных плоскостных распределений дозы.

4. Способ определения коэффициента кросс-калибровки результирующих распределений дозы в лучевой терапии, основанный на использовании верификационного фантома оригинальной конструкции, учитывающий физические свойства дозиметрической системы, параметры радиационного пучка и положение излучателя, а также методики, позволяющие осуществлять

верификацию планируемых индивидуальных распределений дозы при динамическом облучении.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты, изложенные в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. Определение цели и задач исследований, интерпретация и обобщение научных результатов проводились совместно с научными руководителями: д-м техн. наук, проф. М.Г. Киселевым и д-м техн. наук, проф. И.Г. Тарутиным.

Апробация диссертации и информация об использовании ее результатов

Результаты исследований докладывались на следующих конференциях: 4-м съезде онкологов Республики Беларусь (Минск, 2011); научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы лучевого и комбинированного лечения онкозаболеваний и профилактика осложнений – 2012» (Харьков, 2012); республиканской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы онкологии – 2012» (Витебск, 2012); 7-м съезде онкологов и радиологов СНГ (Астана, 2012); республиканской научно-практической конференции с международным участием «Актуальные вопросы диагностики и лечения онкологических заболеваний – 2013» (Минск, 2013); семинаре «Высокотехнологичная лучевая терапия» (Минск, 2013); 3-м международном семинаре «Медицинская физика – современное состояние, проблемы, пути развития. Новейшие технологии» (Киев, 2013); 6-м съезде украинского общества радиационных онкологов с международным участием (Ровно, 2013); республиканском семинаре «Физико-дозиметрическое обеспечение современной лучевой терапии» (Минск, 2014); семинаре «Новые технологии в лучевой терапии» (Минск, 2014); 10-й международной научно-практической конференции «Клиническая онкорadiология» (Москва, 2015); республиканском семинаре «Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии» (Минск, 2015); 11-й международной научно-практической конференции «Радиационная онкология-2016» (Москва, 2016).

Результаты диссертационной работы апробированы при проведении измерений дозиметрических характеристик радиационных пучков линейных ускорителей и верификации планируемых индивидуальных распределений дозы онкологических пациентов при динамическом облучении в онкологических учреждениях Республики Беларусь; при проведении контроля качества функционирования линейных ускорителей на базе РНПЦ ОМР; при проведении

БелМАПО лекционных курсов и практических занятий, посвященных применению современных технологий в лучевой терапии.

Опубликование результатов диссертации

По материалам диссертации опубликовано 34 научные работы, в том числе 11 статей в научных журналах (9 статей, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь, общим объемом 6,52 а. л.), 7 статей в сборниках научных статей и материалов конференций, 12 тезисов докладов. Без соавторов опубликована 1 работа в научном журнале. Материалы диссертации использованы при подготовке 2-х инструктивно-нормативных документов и 1-го технического кодекса установившейся практики, получен патент на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, шести глав, заключения, библиографического списка и двух приложений. Полный объем диссертации 224 страницы. Таблицы и рисунки занимают объем 35 страниц (39 иллюстраций, 23 таблицы). Библиографический список размещен на 18 страницах и насчитывает 213 наименований, включая 34 публикации соискателя. Приложения занимают 20 страниц.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Во **введении** и **общей характеристике** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цель и задачи исследования, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, их научная новизна, приведены сведения об апробации и опубликовании основных результатов диссертации.

В **первой главе** рассмотрены методы современной динамической лучевой терапии (ЛТ), радиотерапевтическое оборудование для ее проведения и его компоненты, существующие процедуры калибровки радиационного выхода (РВ) линейных ускорителей (ЛУ) и контроля качества (КК) их функционирования, включая оценку параметров радиационного пучка, а также способы отпуска планируемых индивидуальных дозовых распределений пациентам. Рассмотрены известные методики и стандарты в области определения абсолютного значения поглощенной дозы фотонов. Показано, что ошибки в его определении зависят как от отклонений параметров радиационного пучка, так и от девиации характеристик ЛУ. Проанализированы известные протоколы КК и международные

рекомендации в области клинической дозиметрии. Отмечено, что в них отсутствует возможность интерпретации результатов функциональных тестов ускорителя в единицах поглощенной дозы, не учитывается влияние параметров радиационного пучка на планируемые индивидуальные распределения дозы, отсутствует контроль условий облучения и расчета доз (принцип глубокоэшелонированной радиационной защиты МАГАТЭ). Проведен анализ существующих процедур верификации индивидуальных дозовых распределений. Отмечено, что известные процедуры предполагают использование дорогостоящего оборудования и программного обеспечения и применимы только для дозиметрической системы определенной формы и внутренней структуры, которая предлагается к использованию производителем оборудования. На основании результатов выполненного анализа сформулированы цель и задачи работы.

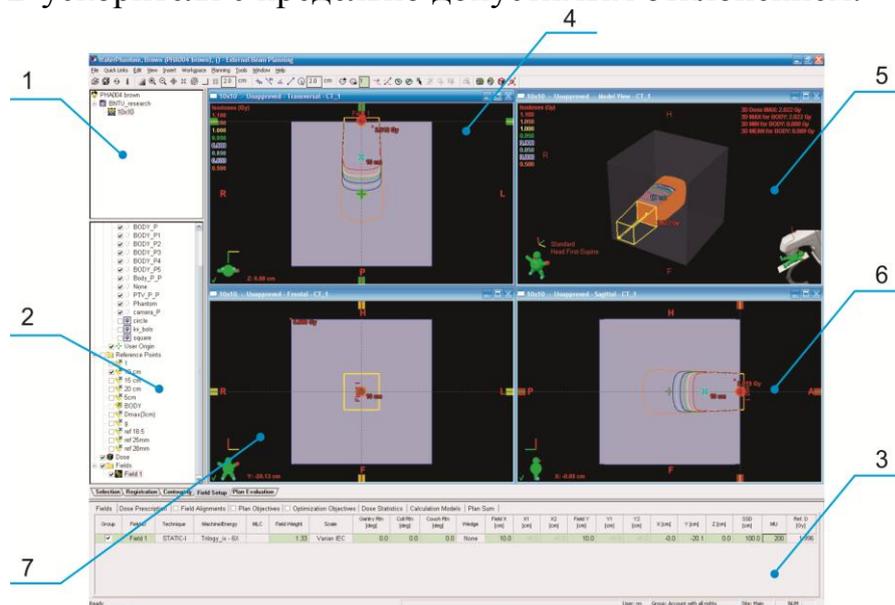
Во **второй** главе представлены методики измерений характеристик радиационных пучков медицинских ЛУ и параметров их многолепестковых коллиматоров (МЛК), которые позволяют установить трехмерное распределение поглощенной дозы в гомогенном фантоме для всех режимов работы ускорителя. Предложены дозиметрические системы для проведения измерений характеристик радиационных пучков и МЛК. Дозиметрические системы включают в себя водозэквивалентный фантом, детекторы ионизирующего излучения, механизм управления перемещениями детектора, дозиметр (одно- или двухканальный), персональный компьютер (ПК) с установленным на нем специализированным программным обеспечением.

Разработанные методики позволили провести измерения следующих характеристик ускорителя Trilogy № 3567 для конфигурации алгоритма расчета дозы Anisotropic Analytical Algorithm (AAA) компьютерной системы планирования облучения (КСПО) Eclipse при облучении планируемыми индивидуальными распределениями дозы фотонов с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ: поглощенной дозы фотонов в стандартных условиях; коэффициентов радиационного выхода ЛУ для размеров прямоугольных полей облучения от 30×30 мм² до 400×400 мм², сформированными диафрагмами ускорителя (для каждого измерения детектор облучался дозой в 200 мониторных единиц); дозовых факторов клиновидных фильтров 15, 30, 45 и 60 град; профильных и процентных глубинных распределений поглощенной дозы для полей с размерами от 30×30 мм² до 400×400 мм² (шаг перемещения детектора – 1 мм; глубины измерений находились в диапазоне от 0 до 300 мм от поверхности фантома; время съема сигнала в каждой точке – 2 с); коэффициентов пропускания лепестков МЛК; нулевого дозиметрического зазора лепестков МЛК.

В третьей главе установлены зависимости между отклонениями опорного значения дозы при калибровке радиационного выхода ЛУ и его характеристиками (включая параметры радиационного пучка). В частности, установлено следующее: отклонение дозы имеет практически линейную зависимость от ошибки при определении коэффициентов РВ ускорителя в диапазоне от -5 до 5 % и составляет от -4,76 до 5,26 %; отклонение дозы имеет практически линейную зависимость от девиации изоцентра вращения штатива ускорителя перпендикулярно плоскости падения радиационного пучка и от ошибки в положении центраторов по вертикальной оси в диапазоне расстояний от излучателя до поверхности фантома от 980 до 1020 мм, и составляет от -3,57 до 3,64 % для 6 МэВ и от -3,51 до 3,58 % для 18 МэВ; отклонение линейно зависит от величины ошибки показаний оптического указателя расстояния источник–поверхность (РИП) для случаев ошибки от -20 до 20 мм и составляет от -3,57 до 3,64 % для 6 МэВ и от -3,51 до 3,58 % для 18 МэВ; отклонение в дозе имеет выраженную линейную зависимость от величины ошибки в установке размеров опорного поля при калибровке РВ ускорителя в диапазоне от -20 до +20 мм и составляет от -1,82 до 2,54 % для 6 МэВ и от -0,68 до 1,33 % для 18 МэВ; отклонение дозы имеет сложную зависимость от изменения мощности дозы при калибровке РВ (от 1 до 6 Гр/мин при опорном значении 3 Гр/мин) и достигает 1,6 % для энергии 6 МэВ и 1,4 % для 18 МэВ; отклонение в дозе линейно зависит от ошибки в определении проникающей способности излучения ЛУ и достигает -1,13 % для 18 МэВ и 0,33 % для 6 МэВ; отклонения других технико-дозиметрических характеристик ускорителей и параметров радиационного пучка от их опорных значений вызывают ошибки при определении дозы менее 1 %.

Осуществлено моделирование условий проведения процедуры калибровки РВ ускорителя с использованием КСПО Eclipse. На основании выполненных с использованием алгоритма AAA контрольных расчетов и средних значений результатов измерений каждой из характеристик ЛУ, оказывающих влияние на дозу, установлено, что отклонение опорного значения дозы для таких случаев не превышает 0,2 % от значений РВ ускорителя, рассчитанных системой Eclipse. Это позволяет использовать созданный гомогенный контрольный фантом с плотностью вещества 1 г/см^2 размерами $300 \times 300 \times 300 \text{ мм}^2$ и сконфигурированный на основании экспериментально полученных дозиметрических данных алгоритм AAA системы Eclipse для определения значения интегральной ошибки в дозе при калибровке РВ медицинского ускорителя для номинальных энергий фотонов 6 и 18 МэВ (пример проведенного расчета дозы представлен на рисунке 1). На основании созданной модели условий калибровки радиационного выхода ускорителя разработан оригинальный способ определения интегральной ошибки в полученном при его калибровке опорном значении поглощенной дозы, основанный на установленных зависимостях

влияния отклонений технико-дозиметрических характеристик ускорителя, а также радиационных пучков на значение дозы в точке калибровки. Способ позволяет исключить возможность превышения предельно допустимого отклонения в величине поглощенной дозы, возникшего вследствие ошибки при определении РВ ускорителя и тем самым повысить уровень радиационной безопасности онкологических пациентов при их облучении планируемыми индивидуальными распределениями дозы. Отличительные признаки разработанного способа: выражается значение интегральной ошибки в дозе, учитывающее влияние всех технико-дозиметрических характеристик ЛУ на калибровку его радиационного выхода; определяется возможность клинического использования ЛУ для проведения ЛТ путем сравнения значения интегральной ошибки в дозе при калибровке РВ ускорителя с предельно допустимым отклонением.



1 – окно выбора курса и плана облучения; 2 – окно виртуальных структур, дозовых точек и полей облучения; 3 – окно параметров плана облучения; 4 – вид контрольного фантома, изодозных кривых и максимального значения дозы в трансверсальной плоскости; 5 – трехмерное представление контрольного фантома и распределения дозы; 6 – вид контрольного фантома, изодозных кривых и максимального значения дозы в сагиттальной плоскости; 7 – вид контрольного фантома и поля облучения во фронтальной плоскости

Рисунок 1. – Компьютерное представление расчета опорного значения дозы для номинальной энергии фотонов 6 МэВ в контрольном фантоме в КСПО Eclipse

В **четвертой** главе на основании статистики заболеваемости за 2003–2012 гг., приведенной в Белорусском канцер-регистре, выявлены наиболее часто встречающиеся в практике онкологических медицинских учреждений Республики Беларусь локализации опухолей. По результатам проведенного с использованием онкологической информационной системы ARIA анализа 630 планов облучения радиотерапевтических пациентов трех категорий с

локализациями опухолевых очагов, которые наиболее часто подвергались лучевому лечению с применением ускорителей в РНПЦ ОМР (220 мужчин с раком предстательной железы, 290 женщин с раком молочной железы и 120 детей, которым было проведено облучение головного мозга), определены анатомические параметры, оказывающие влияние на планируемые распределения дозы, и установлены репрезентативные пациенты со значениями этих параметров, наиболее соответствующими средним их значениям по выборке: для случаев облучения предстательной железы у мужчин: высота структуры BODY – 237,8 мм; ширина структуры BODY – 364,5 мм; клинический объем облучения (КОО) – 338,2 см³; объем предстательной железы – 123,6 см³; объем прямой кишки – 75,7 см³; для случаев облучения молочной железы у женщин: высота BODY – 181,7 мм; ширина BODY – 479,4 мм; КОО – 720,2 см³; объем обоих легких – 2717 см³; объем здоровой молочной железы – 697,8 см³; для случаев облучения головного мозга у детей: высота BODY – 187,7 мм; ширина BODY – 149 мм; КОО – 110,4 см³; объем головного мозга – 1423,7 см³. В КСПО Eclipse создано три виртуальных фантома с анатомическими параметрами, соответствующими таковым для выявленных репрезентативных пациентов. С использованием фантомов установлены зависимости между отклонениями в планируемых индивидуальных дозовых распределениях ЛУ Trilogy № 3567 и его характеристиками. Показано, что отклонения характеристик радиационного пучка ЛУ (мощности дозы, проникающей способности, угловой зависимости радиационного выхода, коэффициентов радиационного выхода) приводят к изменению дозы в каждой точке поля облучения на одинаковую величину, без изменения формы доставляемого индивидуального дозового распределения, а отклонение числа мониторинжных единиц ЛУ, необходимого для доставки предписанной дозы, имеет линейную зависимость от ошибки при определении дозовых факторов клиновидных фильтров в диапазоне от -5 до 5 % и составляет от -4,76 до 5,26 %. Для определения зависимости отклонений в доставляемых пациентам индивидуальных плоскостных распределениях дозы от симметрии и равномерности радиационного пучка ЛУ предложен метод использования коррекционных таблиц, полученных путем моделирования условий облучения созданных фантомов после их коррекции, проведенной на основании результатов дозиметрических измерений в верификационном фантоме.

С использованием созданных фантомов и установленных зависимостей разработана методика оценки ошибок в планируемых индивидуальных распределениях дозы, возникающих вследствие отклонений технико-дозиметрических характеристик медицинских ускорителей, а также параметров радиационного пучка от опорных значений. Схема процедуры определения ошибки в плоскостных планируемых индивидуальных распределениях дозы представлена на рисунке 2. Показано, что использование разработанной методики

позволяет выразить результаты периодического контроля качества всех технико-дозиметрических характеристик медицинского линейного ускорителя в единицах дозы, учесть параметры облучаемых пациентов и опухолей, а также радиационного пучка.

В **пятой главе** рассмотрены вопросы проведения верификации условий лучевого лечения пациентов при их облучении планируемыми индивидуальными распределениями дозы по методам лучевой терапии с модуляцией интенсивности (ЛТМИ). В рамках программы облучения по методу ЛТМИ разработана и внедрена в клиническую практику РНПЦ ОМР методика верификации планируемых индивидуальных распределений дозы пациентов с использованием электронного детектора порталных изображений (ЭДПИ) aS 1000 и дозиметрической системы OCTAVIUS 4D. Проведен анализ ограничений при использовании OCTAVIUS 4D в процессе оценки ЛТМИ планов облучения в РНПЦ ОМР и установлены критерии клинической приемлемости планируемых индивидуальных распределений дозы. Показано, что в период с апреля 2013 по декабрь 2015 г. на основании разработанной методики была проведена верификация более 500 ЛТМИ планов облучения (98 % прошли проверку с первого раза).

Разработана оригинальная конструкция верификационного фантома, состоящая из твердотельного гомогенного водозэквивалентного фантома и матричного анализатора поля, позволяющая осуществлять верификацию доставки планируемых индивидуальных распределений дозы по методикам секторной ЛТМИ. С использованием разработанного фантома получены экспериментальные данные, на основании которых разработан способ определения коэффициента кросс-калибровки результирующих распределений дозы в лучевой терапии, включающий верификацию индивидуальных планов облучения онкологических пациентов (патент РБ № 20122). Данный способ учитывает физические свойства используемой дозиметрической системы, положение излучателя и параметры радиационного пучка при определении интегрального коэффициента кросс-калибровки для дозиметрических верификационных систем произвольной формы, использует в качестве опорного ЛТМИ поле облучения, при этом полученный коэффициент корректен для любого количества направлений пучков фотонов и количества контрольных точек плана облучения онкологического пациента. Параметры окружающей среды в процедурном помещении вызывают отклонение значений калибровочных коэффициентов от их средних значений менее чем на 1 %. Показано, что в период с июня 2012 по декабрь 2015 г. в РНПЦ ОМР на основании разработанного способа была проведена верификация 81 СЛТМИ плана облучения.

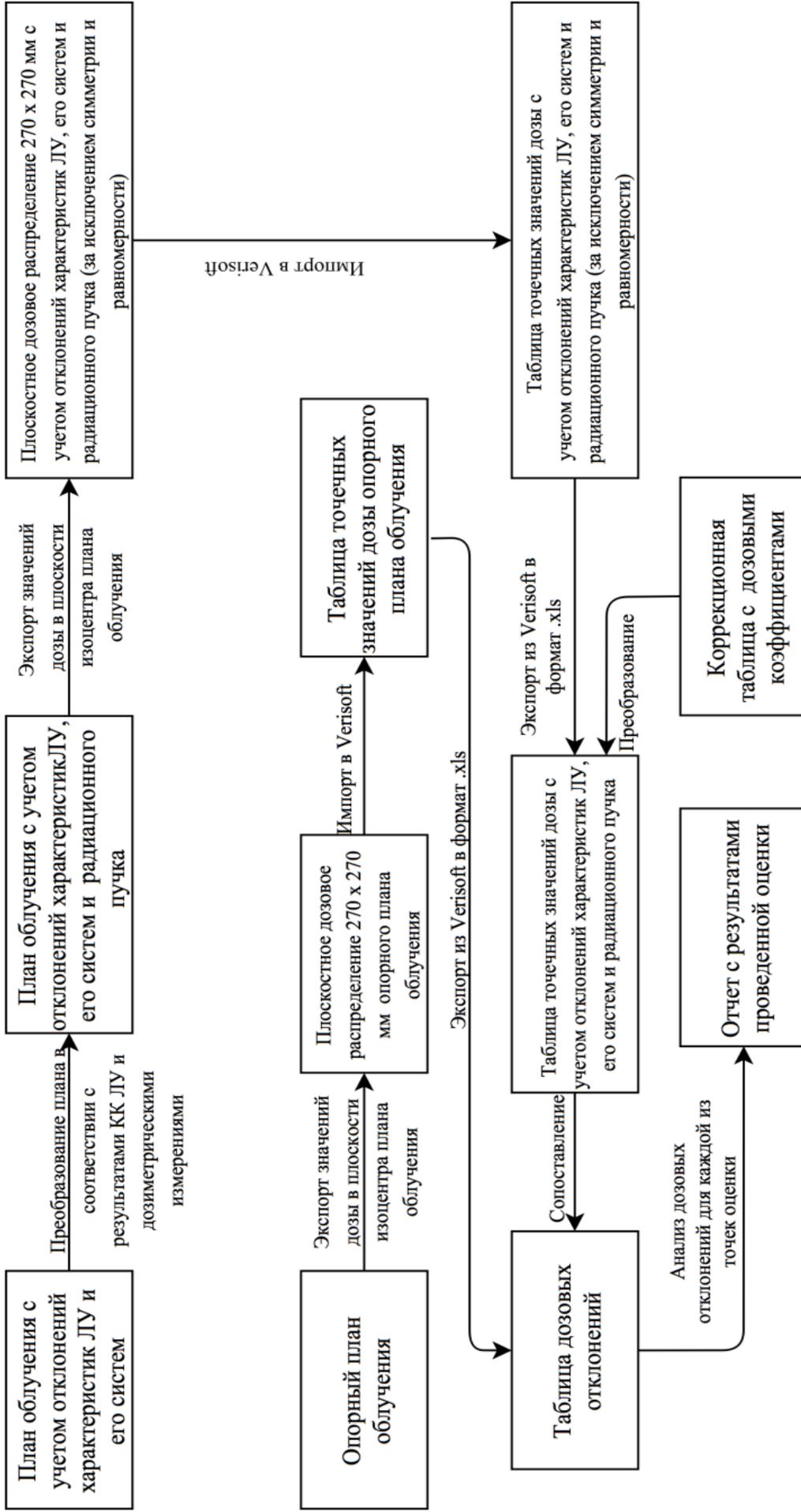
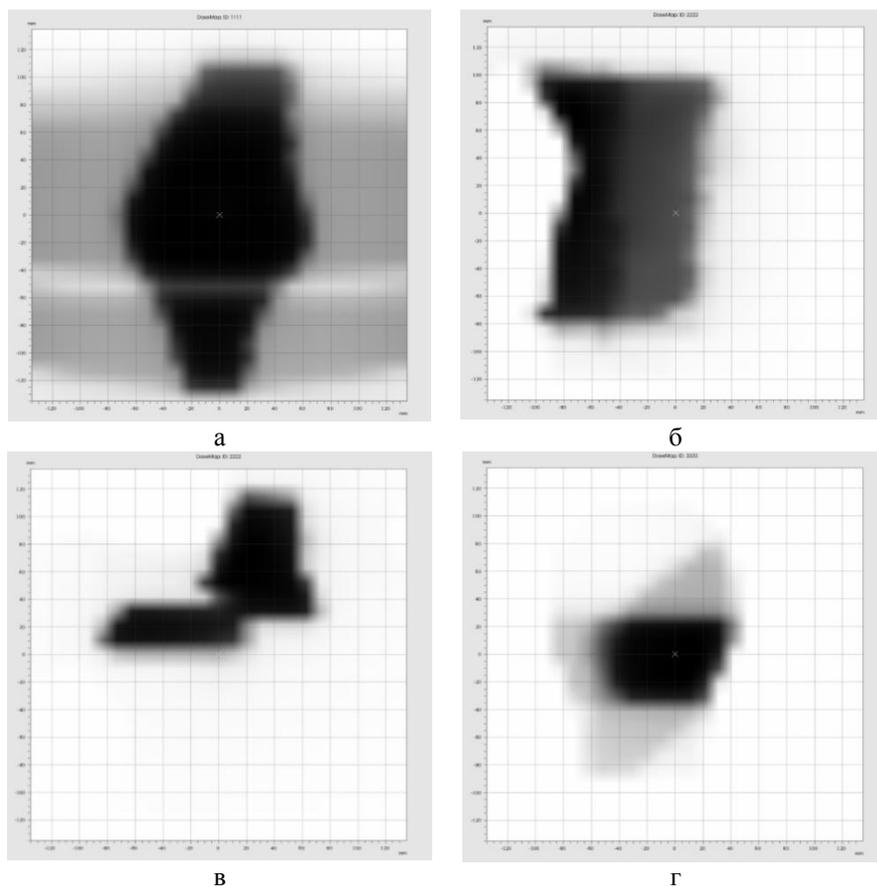


Рисунок 2. – Блок-схема процедуры определения ошибки в распределении дозы, возникающей в результате отклонений технико-дозиметрических характеристик медицинского ускорителя, выявленных при осуществлении периодического контроля качества его функционирования

Шестая глава посвящена разработке эффективной системы контроля качества функционирования медицинского линейного ускорителя, позволяющей оценить возможность его клинической эксплуатации для динамического облучения онкологических пациентов путем анализа планируемых плоскостных индивидуальных распределений дозы и обеспечивающей, таким образом, повышение радиационной защиты больных. Система основана на анализе распределений дозы в плоскости изоцентра индивидуального плана облучения и позволяет учесть параметры радиационного пучка, пациентов и опухолей. Опорные дозовые распределения, использовавшиеся при моделировании условий облучения онкологических пациентов, представлены на рисунке 3. Показано, что использование известных протоколов контроля функционирования медицинских ЛУ не является достаточным для обеспечения радиационной безопасности пациентов вследствие значительных отклонений в доставляемых распределениях дозы (от 12 до 27,9 % точек имеют отклонение в дозе >5 % от предписанного значения), которые могут быть не учтены при вынесении решения о клиническом использовании обследуемого ускорителя для динамического облучения. Такие отклонения в дозе могут привести к неизлечению опухоли и возникновению лучевых осложнений у пациентов, что обуславливает необходимость проведения помимо мероприятий в рамках существующей программы контроля функционирования медицинских ускорителей также независимой оценки возможности клинического применения ЛУ с использованием предложенной системы, для повышения радиационной защиты их здоровых тканей. Предложены уровни вмешательства (процент точек, в которых доза доставляется с требуемой точностью) при осуществлении оценки целесообразности клинического использования медицинского ускорителя с применением созданных фантомов, полученные на основании ретроспективного анализа результатов ежеквартального КК функционирования ускорителя Trilogy № 3567 в период с 2010 по 2014 г. ($N = 20$): отношение количества точек оценки, в которых отклонение дозы составляет менее 5 % от предписанного значения, к общему числу точек должно составлять: для фантома облучения предстательной железы – не менее 95,6 %; для фантома облучения молочной железы (область железы – не менее 94,3 %, область надключичных лимфоузлов – не менее 93,0 %); для фантома облучения головного мозга у детей – не менее 90,5 %. Определена оптимальная периодичность проведения такой оценки, которая составляет один раз в квартал.



а – фантом облучения предстательной железы; б – фантом облучения молочной железы (область молочной железы); в – фантом облучения молочной железы (область надключичных лимфоузлов); г – фантом облучения головного мозга у детей
Рисунок 3. – Изображение планируемых индивидуальных дозовых распределений в ПО Verisoft в плоскости изоцентра опорных планов облучения каждого их созданных виртуальных фантомов

Разработанная система контроля качества внедрена в клиническую практику РНПЦ ОМР и используется совместно с протоколом, утвержденным Министерством здравоохранения Республики Беларусь, при проведении контроля характеристик ЛУ Trilogy № 3567 с января 2015 г., обеспечивая, таким образом, соответствие проводимых процедур динамического облучения рекомендациям МАГАТЭ в области радиационной защиты пациентов. При проведении контроля характеристик ЛУ Trilogy № 3567 с использованием разработанной системы не были выявлены случаи превышения уровней вмешательства, что свидетельствует о том, что в РНПЦ ОМР поддерживается высокий уровень радиационной безопасности пациентов. Отмечено, что при проведении ретроспективного анализа результатов КК за 2010–2014 гг. было выявлено два случая превышения установленных уровней вмешательства. Для них были выявлены характеристики ЛУ, оказавшие доминирующее воздействие на ошибку в планируемых индивидуальных распределениях дозы. Показано, что дополнительное машинное

время, необходимое на осуществление разработанной системы, составляет менее одного часа в квартал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Разработаны методики регистрации параметров радиационных пучков и многолепестковых коллиматоров медицинских линейных ускорителей для динамического облучения, с использованием которых определены следующие характеристики ускорителя Trilogy № 3567 при облучении фотонами с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ: поглощенная доза фотонов в стандартных условиях; коэффициенты радиационного выхода ЛУ для размеров прямоугольных полей облучения от $30 \times 30 \text{ мм}^2$ до $400 \times 400 \text{ мм}^2$; ДФК клиньев 15, 30, 45 и 60 град; профильные и процентные глубинные распределения дозы для квадратных радиационных полей от $30 \times 30 \text{ мм}^2$ до $400 \times 400 \text{ мм}^2$; коэффициенты пропускания лепестков МЛК; нулевой дозиметрический зазор МЛК. Средние значения измеренных характеристик использованы для конфигурации алгоритма расчета дозы Anisotropic Analytical Algorithm системы Eclipse, что позволило получить трехмерное распределение поглощенной дозы для всех режимов его работы и создать в ней модель калибровки радиационного выхода, а также доставки планируемых индивидуальных распределений дозы ЛУ Trilogy [1, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 24, 29, 31].

2. Получены зависимости, отражающие влияние технико-дозиметрических характеристик медицинского ЛУ, а также параметров его радиационных пучков с номинальными энергиями 6 и 18 МэВ на ошибку в дозе при калибровке радиационного выхода ускорителя. Установлено, что доминирующее влияние на ошибку в дозе оказывают отклонения от опорного значения следующих параметров: отклонение дозы имеет линейную зависимость от ошибки при определении коэффициентов РВ ЛУ в диапазоне от -5 до 5 % и составляет от -4,76 до 5,26 %; отклонение дозы имеет линейную зависимость от девиации изоцентра вращения штатива ускорителя перпендикулярно плоскости падения радиационного пучка и от ошибки в положении центраторов по вертикальной оси в диапазоне расстояний от источника излучения до поверхности фантома от 980 до 1020 мм, и составляет от -3,57 до 3,64 % для 6 МэВ и от -3,51 до 3,58 % для 18 МэВ; отклонение дозы линейно зависит от величины ошибки показаний оптического указателя РИП для случаев ошибки от -20 до +20 мм и составляет от -3,57 до 3,64 % для 6 МэВ и от -3,51 до 3,58 % для 18 МэВ; отклонение в дозе имеет линейную зависимость от ошибки в установке размеров поля в диапазоне от -20 до +20 мм и составляет от -1,82 до 2,54 % для 6 МэВ и от -0,68 до 1,33 %

для 18 МэВ. На основании полученных зависимостей разработан способ определения интегральной ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода медицинского ускорителя (заявка на патент РФ № А20150402, дата подачи 31.07.2015), основанный на созданной в системе Eclipse модели калибровки (гомогенный фантом с плотностью вещества 1 г/см² и размерами 300 × 300 × 300 мм³) и результатах контроля постоянства его характеристик [6, 8, 13, 34].

3. Разработана методика комплексной оценки ошибок в планируемых плоскостных индивидуальных распределениях дозы, доставляемых пациентам ускорителем, основанная на модели ЛУ Trilogy в КСПО Eclipse с использованием виртуальных фантомов с анатомическими параметрами, соответствующими средним значениям (630 планов облучения) для трех категорий больных, с локализациями опухолей, которые наиболее часто подвергались облучению с применением ускорителей в РНПЦ ОМР: облучение предстательной железы: высота BODY – 237,8 мм; ширина BODY – 364,5 мм; КОО - 338,2 см³; объем железы 123,6 см³; объем прямой кишки – 75,7 см³; облучение молочной железы: высота BODY – 181,7 мм; ширина BODY – 479,4 мм; КОО – 720,2 см³; объем обоих легких – 2717 см³; объем здоровой молочной железы – 697,8 см³; облучение головного мозга у детей: высота BODY – 187,7 см; ширина BODY – 149 мм; КОО – 110,4 см³; объем мозга – 1423,7 см³. С применением разработанной методики проведено исследование индивидуальных распределений дозы для значений допустимых отклонений характеристик ускорителей известных протоколов контроля ЛУ. Показано, что использование всех известных протоколов не является достаточным для обеспечения радиационной безопасности больных вследствие значительных отклонений в доставляемых дозовых распределениях (от 12 до 27,9 % точек имеют отклонение более 5 % от предписанного значения дозы), которые могут быть не учтены. На основании предложенной методики разработана система контроля качества функционирования медицинских линейных ускорителей в лучевой терапии (заявка на патент РФ № А20160057, дата подачи 23.02.2016), позволяющая осуществлять эффективную радиационную защиту больных на основании анализа планируемых индивидуальных распределений дозы в плоскости изоцентра плана облучения с учетом параметров радиационного пучка, пациентов и опухолей. На основании результатов проведенной ретроспективной оценки результатов контроля параметров ускорителя Trilogy № 3567 в период с 2010 по 2014 г. (N = 20) предложены минимально приемлемые значения отношения количества точек, в которых отклонение дозы составляет менее 5 % от предписанного значения, к общему числу точек: фантом предстательной железы – не менее 95,6 %; фантом облучения молочной железы (область железы – не менее 94,3 %,

область лимфоузлов – не менее 93,0 %); фантом головного мозга – не менее 90,5 % [7, 9, 12, 13, 21, 22, 28, 32].

4. Разработан способ определения интегрального кросс-калибровочного коэффициента распределения дозы в лучевой терапии (патент РБ № 20122), полученный с использованием новой конструкции верификационного фантома (твердотельный гомогенный водозэквивалентный фантом и матричный анализатор поля) и методики проведения кросс-калибровки комплексных планируемых индивидуальных дозовых распределений, основанной на однократном измерении значения поглощенной дозы. Получены экспериментальные данные, отражающие влияние угла наклона штатива ускорителя, а также изменения температуры, давления и влажности воздуха в процедурном помещении на значения калибровочных коэффициентов. Установлено, что имеет место устойчивая однозначная зависимость значений этих коэффициентов от угла наклона штатива, а влияние параметров окружающей среды в процедурном помещении вызывает отклонение их значений от средних менее чем на 1%. Разработанный способ учитывает физические свойства используемой дозиметрической системы, параметры радиационного пучка и положение излучателя при определении интегрального коэффициента кросс-калибровки для дозиметрических верификационных систем произвольной формы. Предложены методики верификации облучения пациентов при проведении лучевой терапии с модуляцией интенсивности (в том числе и секторной). В период с июня 2012 по декабрь 2015 г. на основании разработанного способа была проведена верификация 81 ЛТМИ плана облучения пациентов, облучавшихся в РНПЦ ОМР, из которых проверку прошли 98,7% [2, 3, 4, 5, 10, 20, 23, 25, 26, 27, 30, 33].

Рекомендации по практическому использованию результатов

1. Разработанную систему контроля качества функционирования медицинских линейных ускорителей целесообразно применять во всех онкологических учреждениях при проведении контроля постоянства параметров линейных ускорителей с целью повышения радиационной защиты пациентов. Система апробирована и внедрена в клиническую практику РНПЦ ОМР (акт о внедрении от 14.04.2016; 4 положительных наблюдения, 0 отрицательных и неопределенных).

2. Разработанные методики регистрации дозиметрических характеристик радиационных пучков и многолепесткового коллиматора ускорителей, а также способ определения интегральной ошибки в опорном значении дозы, полученном при проведении калибровки РВ медицинского линейного ускорителя апробированы и внедрены в клиническую практику медицинских учреждений Республики Беларусь, в которых проводится лучевая терапия с применением ЛУ

(7 актов внедрения; 611 положительных наблюдений, 0 отрицательных и неопределенных), утверждены в качестве обязательных Министерством здравоохранения Республики Беларусь (инструкция по применению № 092-0914) [31].

3. Разработанный способ определения интегрального кросс-калибровочного коэффициента распределения дозы в лучевой терапии (патент РБ № 20122) [33] и предложенные методики верификации облучения больных при проведении лучевой терапии с модуляцией интенсивности (инструкция по применению № 092-0914) [31] внедрены во всех онкологических учреждениях РБ при проведении такого облучения (7 актов внедрения; 1599 положительных наблюдений, 16 отрицательных и 0 неопределенных). Способ позволил проводить верификацию облучения ЛТМИ в РНПЦ ОМР без дополнительной закупки дорогостоящего дозиметрического оборудования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в рецензируемых научных журналах

1. Титович, Е. В. Контроль качества характеристик современных медицинских ускорителей электронов / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, М. Г. Киселев // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 1. – С. 112–116.

2. Методика и аппаратные средства отпуска дозы при динамических методах дистанционной лучевой терапии / Е. В. Титович, А. И. Гмырак, И. Г. Тарутин, М. Г. Киселев // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1. – С. 97–102.

3. Титович, Е. В. Верификация планов облучения по методике Rapid Arc / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, А. И. Гмырак // Мед. физика. – 2013. – № 4. – С. 12–18.

4. Титович, Е. В. Верификация планов облучения по методике VMAT с использованием измерительной дозиметрической системы OCTAVIUS 4D / Е. В. Титович // Мед. физика. – 2014. – № 3. – С. 19–26.

5. Титович, Е. В. Оптимизация программы гарантии качества облучения пациентов по методике IMRT / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, А. А. Жигун // Мед. физика. – 2014. – № 4. – С. 14–21.

6. Титович, Е. В. Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Ч. 1: Зависимость от механических параметров штатива / Е. В. Титович, М. Г. Киселев // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 2. – С. 230–238.

7. Титович, Е. В. Влияние характеристик медицинских линейных ускорителей на дозовые распределения с учетом анатомии пациента и параметров опухоли. Ч. 1: Отклонения механических параметров / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, М. Г. Киселев // Мед. физика. – 2015. – № 4. – С. 32–41.

8. Титович, Е. В. Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Ч. 2 : Зависимость характеристик коллиматора, указателя расстояния источник-поверхность, радиационного поля, лазерных центраторов, терапевтического стола / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, М. Г. Киселев // Приборы и методы измерений. – 2016. – № 1. – С. 85–94.

9. Титович, Е. В. Влияние характеристик медицинских линейных ускорителей на дозовые распределения с учетом анатомии пациента и параметров опухоли. Ч. 2: Отклонения дозиметрических параметров / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, М. Г. Киселев // Мед. физика. – 2016. – № 1. – С. 20–28.

Статьи в сборниках и материалах конференций

10. Техническая и дозиметрическая поддержка методики ИМРТ / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, Г. В. Гацкевич, М. В. Дроздова // Укр. радіолог. журн. – 2012. – Т. 20, вип. 2 : Актуальные вопросы лучевого и комбинированного лечения онкозаболеваний и профилактика осложнений : материалы науч.-практ. конф., Харьков, 21–22 мая 2012 г. – Харьков, 2012. – С. 213–216.

11. Гацкевич, Г. В. Дозиметрическое обеспечение стереотаксического облучения пациентов / Г. В. Гацкевич, И. Г. Тарутин, Е. В. Титович // Укр. радіолог. журн. – 2012. – Т. 20, вип. 2 : Актуальные вопросы лучевого и комбинированного лечения онкозаболеваний и профилактика осложнений : материалы науч.-практ. конф., Харьков, 21–22 мая 2012 г. – Харьков, 2012. – С. 146–147.

12. О создании новых протоколов контроля качества оборудования для лучевой терапии / И. Г. Тарутин, Г. В. Гацкевич, Е. И. Титович, М. В. Дроздова // Укр. радіолог. журн. – 2012. – Т. 20, вип. 2 : Актуальные вопросы лучевого и комбинированного лечения онкозаболеваний и профилактика осложнений : материалы науч.-практ. конф., Харьков, 21–22 мая 2012 г. – Харьков, 2012. – С. 211–212.

13. Преимущества использования 4D лучевой терапии в лечении пациенток, страдающих раком молочной железы / Е. В. Титович, М. Н. Петкевич, И. И. Минайло, О. И. Моисеева, А. П. Мельник, И. А. Якубович // Актуальные вопросы онкологии : материалы респ. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Витебск, 1–2 ноября 2012 г. / Витеб. гос. мед. ун-т ; редкол.: Н. Г. Луд [и др.]. – Витебск, 2012. – С. 213–214.

14. Тарутин, И. Г. Применение медицинских ускорителей электронов для высокотехнологичной лучевой терапии / И. Г. Тарутин, Е. В. Титович // Медицинская физика – современное состояние, проблемы, пути развития.

Новейшие технологии : сб. науч. тр. III Междунар. семинара, Киев, 6–7 июля 2013 г. / Киев. нац. ун-т им. Тараса Шевченко. – Киев, 2013. – С. 38–41.

15. Титович, Е. В. Дозиметрическое обеспечение лучевой терапии / Е. В. Титович // Физико-дозиметрическое обеспечение современной лучевой терапии : докл. респ. науч.-практ. семинара с междунар. участием для инж.-техн. персонала онкол. Учр. страны, Минск, апрель 2014 г. / Респ. науч.-практ. центр онкологии и мед. радиологии им. Н. Н. Александрова. – Минск, 2014. – С. 4.

16. Титович, Е. В. Контроль качества работы линейных ускорителей электронов / Е. В. Титович // Новые технологии в лучевой терапии : докл. респ. семинара, Минск, 5 декабря 2014 г. / Респ. науч.-практ. центр онкологии и мед. радиологии им. Н. Н. Александрова. – Минск, 2014. – С. 4.

Тезисы докладов на научных конференциях

17. Об изменении протоколов контроля качества оборудования для лучевой терапии / И. Г. Тарутин, Г. В. Гацкевич, Е. В. Титович, М. В. Дроздова // Онколог. журн. – 2011. – Т. 5, № 3 : IV съезд онкологов Республики Беларусь : материалы съезда, Минск, 3–5 ноября 2011 г. – Минск, 2011. – С. 47.

18. Гацкевич, Г. В. Проблемы клинической дозиметрии в лучевой терапии / Г. В. Гацкевич, И. Г. Тарутин, Е. В. Титович // Онколог. журн. – 2011. – Т. 5, № 3 : IV съезд онкологов Республики Беларусь : материалы съезда, Минск, 3–5 ноября 2011 г. – Минск, 2011. – С. 47–48.

19. Физико-дозиметрические аспекты лучевой терапии злокачественных опухолей : междунар. семинары / И. Г. Тарутин, Г. В. Гацкевич, Е. В. Титович, А. К. Букато, М. В. Дроздова, Д. И. Козловский // Актуальные вопросы лучевого и комбинированного лечения онкозаболеваний и профилактика осложнений : материалы науч.-практ. конф., Харьков, 21–22 мая 2012 г. – Харьков, 2012. – С. 212–213.

20. Гацкевич, Г. В. Дозиметрическая поддержка современных методик лучевой терапии / Г. В. Гацкевич, А. И. Гмырак, Е. В. Титович // Онколог. журн. – 2013. – Т. 7, № 4 : Актуальные вопросы диагностики и лечения онкологических заболеваний : материалы респ. науч.-практ. конф., Минск, 20 декабря 2013 г. – Минск, 2013. – С. 18.

21. Контроль качества работы систем EPID и OBI в дистанционной лучевой терапии / Е. В. Титович, М. Н. Петкевич, А. А. Жигун, И. Г. Тарутин // Онколог. журн. – 2013. – Т. 7, № 4 : Актуальные вопросы диагностики и лечения онкологических заболеваний : материалы респ. науч.-практ. конф., Минск, 20 декабря 2013 г. – Минск, 2013. – С. 56.

22. Тарутин, И. Г. Применение линейных ускорителей электронов в высокотехнологичной лучевой терапии / И. Г. Тарутин, Е. В. Титович // Онколог.

журн. – 2013. – Т. 7, № 4 : Актуальные вопросы диагностики и лечения онкологических заболеваний : материалы респ. науч.-практ. конф., Минск, 20 декабря 2013 г. – Минск, 2013. – С. 55–56.

23. Титович, Е. В. Ускорители фирмы «Вариан» для реализации высокотехнологичных методов лучевой терапии / Е. В. Титович // Онколог. журн. – 2013. – Т. 7, № 2 (26) : Высокотехнологичная лучевая терапия : тез. докл. респ. семинара, Минск, 22 марта 2013 г. – Минск, 2013. – С. 126.

24. Гацкевич, Г. В. Систематизация, архивирование и использование дозиметрической информации в лучевой терапии / Г. В. Гацкевич, И. Г. Тарутин, Е. В. Титович // Укр. радіол журн. – 2013. – Т. 21, вип. 2 : VI съезд украинского общества радиационных онкологов с международным участием : тез. докл., Ровно, 25–27 июня 2013 г. – Ровно, 2013 – С. 170–171.

25. Внедрение методики RapidArc в клиническую практику ГУ «РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова». Аспекты планирования / М. Н. Петкевич, Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, А. В. Парчайкина // Укр. радіолог. журн. – 2013. – Т. 21, вип. 2 : VI съезд украинского общества радиационных онкологов с международным участием : тез. докл., Ровно, 25–27 июня 2013 г. – Ровно, 2013. – С. 219–221.

26. Внедрение методики RapidArc в клиническую практику ГУ «РНПЦ ОМР им. Н. Н. Александрова». Дозиметрические аспекты / Е. В. Титович, М. Н. Петкевич, И. Г. Тарутин, Г. В. Гацкевич // Укр. радіолог журн. – 2013. – Т. 21, вип. 2 : VI съезд украинского общества радиационных онкологов с международным участием : тез. докл., Ровно, 25–27 июня 2013 г. – Ровно, 2013. – С. 239–241.

27. Контроль качества компьютерных систем планирования дистанционного облучения / М. Н. Петкевич, Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, А. А. Жигун // Онколог. журн. – 2013. – Т. 7, № 4 : Актуальные вопросы диагностики и лечения онкологических заболеваний : тез. докл. респ. науч.-практ. конф. с междунар. уч., Минск, 20 декабря 2013 г. – Минск, 2013. – С. 44.

28. Первый опыт применения 4D лучевой терапии в лечении больных раком молочной железы в Республике Беларусь / Е. В. Титович, М. Н. Петкевич, И. И. Минайло, О. И. Моисеева, А. П. Мельник, И. А. Якубович / Онколог. журн. – 2012. – Т. 6, № 4 : VII съезд онкологов и радиологов СНГ : тез. докл., Астана, 5–7 сентября 2012 г. – Астана, 2012. – С. 85.

Статьи в научных журналах

29. Тарутин, И. Г. Дозиметрическое сопровождение высокотехнологичной лучевой терапии. Инструкция по применению / И. Г. Тарутин, Е. В. Титович, Г. В. Гацкевич // Укр. Радіолог. журн. – 2014. – Т. 22, вип. 2. – С. 51–54.

30. Титович, Е. В. Верификационные мероприятия при облучении пациентов с использованием методики IMRT в РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, Г. В. Гацкевич // Укр. Радіолог. журн. – 2014. – Т. 22, вип. 2. – С. 54–57.

Инструктивно-нормативные документы

31. Титович, Е. В. Методы дозиметрического сопровождения высокотехнологичной лучевой терапии : инструкция по применению. Регистрационный № 037-1-0515 / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, Г. В. Гацкевич / Респ. науч.-практ. центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова. – Минск, 2014. – 44 с.

32. Методы оценки характеристик лучевого лечения онкологических пациентов при проведении высокотехнологичного облучения на медицинских ускорителях электронов : инструкция по применению. Регистрационный № 092-0914 / И. Г. Тарутин, Е. В. Титович, Г. В. Гацкевич, А. А. Жигун / Респ. науч.-практ. центр онкологии и медицинской радиологии им. Н. Н. Александрова. – Минск, 2015. – 47 с.

Патент

33. Способ определения интегрального кросс-калибровочного коэффициента распределения дозы в лучевой терапии посредством верифицированной дозиметрической системы : пат. 20122 Респ. Беларусь : МПК А61N5/00 (2006.01) / Е. В. Титович, И. Г. Тарутин, А. И. Гмырак ; опубл. 30.06.2016.

Технические кодексы установившейся практики

34. Метрологическое обеспечение аппаратов медицинских терапевтических, оснащенных источниками ионизирующего излучения : ТКП 532-2014 (04020). Утв. и введен в действие пост. М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 26 марта 2014 г., № 19. – Минск : М-во здравоохранения Респ. Беларусь ; БелГИСС, 2014. – 29 с.

РЭЗІЮМЭ

Цітовіч Ягор Уладзіміравіч

МЕТОДЫКА І АПАРАТНЫЯ СРОДКІ ВЫЗНАЧЭННЯ ЎПЛЫВУ ПАРАМЕТРАЎ РАДЫЯЦЫЙНАГА ПУЧКА ДЛЯ ІНДЫВІДУАЛІЗАЦЫІ ПЛАНУЕМЫХ ДОЗАВЫХ РАЗМЕРКАВАННЯЎ ПРЫ ДЫНАМІЧНЫМ АПРАМЕНЬВАННІ

Ключавыя словы: лінейны паскаральнік, радыяцыйны пучок, дынамічнае апраменьванне, індывідуальнае размеркаванне дозы, верыфікацыя.

Мэта работы: распрацоўка сістэмы кантролю якасці функцыянавання лінейных медыцынскіх паскаральнікаў электронаў для дынамічнага апраменьвання анкалагічных пацыентаў, якая забяспечвае павышэнне іх радыяцыйнай бяспекі пры рэалізацыі індывідуальных размеркаванняў дозы.

Метады даследавання і абсталяванне: мадэляванне індывідуальных размеркаванняў дозы было выканана у камп'ютэрнай сістэме Eclipse. Пры выкананні даследаванняў былі выкарыстаны як апрабаваныя, так і спецыяльна распрацаваныя метадыкі, і апаратныя сродкі.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: распрацаван спосаб вызначэння інтэгральнай памылкі ў атрыманым падчас каліброўцы радыяцыйнага выхаду лінейнага паскаральніка значэнні дозы, які дазваляе шляхам параўнання яе значэння з гранічна дапушчальным адхіленнем вызначыць магчымасць яго клінічнага выкарыстання. Прапанаваны новыя метадыкі верыфікацыі індывідуальных размеркаванняў дозы з мадуляцыяй інтэнсіўнасці выпраменьвання, і з выкарыстаннем верыфікацыйнага фантома арыгінальнай канструкцыі распрацаван спосаб вызначэння інтэгральнага крос-калібровачнага каэфіцыента размеркавання дозы пад час прамянёвай тэрапіі. Распрацавана сістэма кантролю якасці функцыянавання медыцынскага паскаральніка пад час прамянёвай тэрапіі, якая забяспечвае павышэнне радыяцыйнай бяспекі пацыентаў шляхам дадатковай ацэнкі мэтазгоднасці яго клінічнай эксплуатацыі па выніках аналізу размеркаванняў дозы з улікам параметраў радыяцыйнага пучка.

Рэкамендацыі па выкарыстанню: вынікі работы могуць быць выкарыстаны ва ўсіх установах аховы здароўя, у якіх ажыццяўляецца дынамічнае апраменьне пацыентаў радыяцыйнымі пучкамі.

Вобласць прымянення: прамянёвая тэрапія.

РЕЗЮМЕ

Титович Егор Владимирович

МЕТОДИКА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ ПЛАНИРУЕМЫХ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕНИИ

Ключевые слова: линейный ускоритель, радиационный пучок, динамическое облучение, индивидуальное распределение дозы, верификация.

Цель работы: разработка системы контроля качества функционирования медицинских линейных ускорителей электронов для динамического облучения онкологических пациентов, обеспечивающей повышение их радиационной защиты при реализации индивидуальных распределений дозы.

Методы исследования и оборудование: моделирование индивидуальных распределений дозы выполнялось в компьютерной системе Eclipse. При выполнении исследований использовались как апробированные, так и специально разработанные методики и аппаратные средства.

Полученные результаты и их новизна: разработан способ определения интегральной ошибки в дозе при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя, позволяющий путем сравнения ее значения с предельно допустимым отклонением определять возможность его клинического использования. Предложены новые методики верификации индивидуальных распределений дозы с модуляцией интенсивности излучения и с использованием верификационного фантома оригинальной конструкции, разработан способ определения интегрального кросс-калибровочного коэффициента распределения дозы в лучевой терапии. Разработана система контроля качества функционирования медицинского линейного ускорителя при динамическом облучении, обеспечивающая повышение радиационной защиты больных путем дополнительной оценки целесообразности его клинической эксплуатации на основании анализа планируемых индивидуальных плоскостных распределений дозы с учетом параметров радиационного пучка.

Рекомендации по использованию: результаты работы могут быть использованы во всех медицинских учреждениях, осуществляющих динамическое облучение пациентов радиационными пучками.

Область применения: лучевая терапия.

SUMMARY

Titovich Egor Vladimirovich

TECHNIQUE AND HARDWARE TOOLS FOR DETERMINING THE IMPACT OF RADIATION BEAM PARAMETERS FOR THE INDIVIDUALIZATION OF THE PLANNED DOSE DISTRIBUTIONS USING DYNAMIC IRRADIATION

Keywords: linear accelerator, radiation beam, dynamic irradiation, individual dose distribution, verification.

The purpose of the work: the development of the quality control system of medical linear accelerators functioning for dynamic irradiation of cancer patients, providing the increase of their radiation protection during individual dose distributions delivery.

Research methods and equipment: individual dose distributions modeling was performed in the Eclipse computer system. In carrying out of research both certified, and specially developed techniques and hardware tools were used.

The obtained results and their novelty: the method for determining the integral error in the dose value during medical linear accelerator radiation output calibration is developed, allowing to determine the possibility of its clinical use by comparing this error value with the maximum allowable deviation. The new methods of verification of the oncology patient's intensity modulated individual dose distributions are proposed and, using the originally designed verification phantom, the method of determining the integral cross-calibration coefficient of the dose distribution in radiation therapy is developed. The system of quality control of functioning of medical linear accelerator for dynamic irradiation is developed, providing increase of radiation protection of patients by further evaluation of the feasibility of its clinical use for patients irradiation, according to the analysis of the planned individual planar patients dose distributions considering to the parameters of the radiation beam.

Recommendations for use: the results can be used in all healthcare institutions, carrying out dynamic radiation therapy.

Scope: radiation therapy.

Титович Егор Владимирович

**МЕТОДИКА И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННОГО ПУЧКА ДЛЯ ИНДИВИДУАЛИЗАЦИИ
ПЛАНИРУЕМЫХ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ
ОБЛУЧЕНИИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

по специальности 05.11.17 – Приборы, системы и изделия медицинского
назначения

Подписано в печать 19.10.16. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 60 экз. Заказ 324.

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.
ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6