

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра медицинской физики

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ

название темы выпускной квалификационной работы полужирным шрифтом

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2221 группы

направления 03.04.02 «Физика, профиль «Медицинская физика»

код и наименование направления (профиля)

Институт Физики

наименование факультета, института, колледжа

Ясин Мохаммед Атир Ясин

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

Зав. кафедрой д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

АС
подпись, дата

подпись, дата

16.06.25

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025 год



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В настоящее время уровень заболеваемости онкологией растет с каждым годом. В мире постоянно совершенствуются методы диагностики и лечения онкологических заболеваний, что позволило увеличить число пациентов, переживших первый год борьбы с болезнью.

Современные технологии позволяют врачам лечить даже те формы рака, которые ранее считались неизлечимыми. В арсенале специалистов ядерная медицина и лучевая терапия, которые подбираются индивидуально в зависимости от типа опухоли. По данным ВОЗ (Всемирной организации здравоохранения), в радиотерапии нуждаются 75% пациентов дерматологического и онкологического профилей.

Лучевая терапия это неинвазивный метод лечения рака, использующий ионизирующее излучение. Основные источники ионизирующего излучения в современной лучевой терапии — линейные ускорители, генерирующие фотонные, протонные и электронные радиоволны высокой мощности, и рентгенотерапевтические установки, создающие рентгеновское излучение низких и средних энергий.

Современное оборудование для лучевой терапии значительно расширило возможности лечения. Наряду с высокотехнологичными методами остаются востребованными классические подходы, такие как рентгеновская и гамма-терапия. Особый интерес представляют аппараты различного назначения: от компактных решений для поверхностных опухолей (близкофокусная рентгенотерапия) до высокоточных установок для глубокозалегающих опухолей (медицинские линейные ускорители)..

Цель работы. Провести сравнительный анализ современных и классических методов лучевой терапии, а также коммерческих аппаратов, оценив их физико-технические параметры и клиническую эффективность.

Задачи исследования:

1. Провести анализ литературных данных по применению методов лучевой терапии.
2. Провести сравнительный анализ аппаратов рентгенотерапии: SENSUS SRT-100 и Xstrahl 300.
3. Провести сравнительный анализ гамма-терапевтических аппаратов: Gamma Knife и TERABALT-100 ACS.
4. Провести сравнительный анализ линейных ускорителей Varian TrueBeam и Elekta SynergyS.

Научная новизна состоит в проведении комплексного анализа современных и классических методов лучевой терапии.

Практическая значимость заключается в разработке рекомендаций по выбору метода лучевой терапии на основе технических характеристик аппаратов.

Структура магистерской диссертации состоит из введения, трех глав, заключения, списка используемой литературы (27 источников), включает 36 рисунков. Основной текст работы представлен на 64 страницах.

Основное содержание работы

В первой главе приведен обзор современных методов лучевой терапии.

Показано, что IMRT и VMAT стали ключевыми методами современной лучевой терапии, обеспечивая высокую точность и минимальное повреждение здоровых тканей. Если IMRT остается золотым стандартом для сложных случаев, требующих максимальной конформности, то VMAT предлагает сопоставимую эффективность при значительном сокращении времени лечения. Дальнейшее развитие этих технологий связано с

автоматизацией, адаптивными подходами и интеграцией с другими методами, такими как протонная терапия и иммуноонкология.

Интеграция искусственного интеллекта, адаптивной лучевой терапии и протонной терапии с методами IMRT и VMAT представляет собой новый этап в развитии радиационной онкологии. Эти технологии не только повышают точность и безопасность лечения, но и открывают путь к персонализированной медицине, где каждый пациент получает оптимальный план терапии, адаптированный к его индивидуальным особенностям.

Современная дистанционная лучевая терапия использует все типы излучения, и дальнейшее расширение их списка представляется маловероятным. Мнение о том, что применение новых типов излучения уменьшает роль существующих, является ошибочным. История учит, что все типы излучения, внедренные в рутинную клиническую практику, начиная с рентгеновских лучей, нашли свою соответствующую нишу и продолжают успешно применяться. Современные технологии визуализации вносят значительный вклад в прогресс лучевой терапии.

Рассмотрены основные этапы лучевой терапии. После постановки диагноза, выбора стратегии лечения и показаний к лучевой терапии начинается первый этап – топометрия. Перед ее проведением пациент (или часть тела) надежно, но комфортно фиксируется на столе диагностической установки с помощью иммобилизационных средств: термопластических масок, быстротвердеющей пены, металлических рам и т.д. Это же устройство используется позже во время фракционированного облучения. На этапе топометрии определяются: клиническая мишень – объем, подлежащий радикальному облучению, включающий видимую опухоль, зону ее клинического распространения, пути лимфооттока и области профилактического облучения. Также определяется зона интереса – прилегающие здоровые ткани, органы и структуры, которые неизбежно или

потенциально попадут в поле облучения. Исследование этой зоны критически важно, так как дозу здесь необходимо избирательно минимизировать из-за разной радиочувствительности и толерантности здоровых структур, что часто определяет выбор плана лечения. Точность описания мишени и зоны интереса, достигаемая с использованием всего арсенала современных диагностических средств (многоаппаратная топометрия), является ключевым фактором успеха.

Поскольку на разных стадиях опухолевого роста проявляются различные патологические изменения, максимально точное, объективное и полное описание мишени и зоны интереса возможно только при комплексном использовании диагностических методов, реагирующих на разные дефекты. Акцент на визуализации обусловлен тем, что современные технологии формирования дозового распределения сложной конфигурации решают задачу лучше, чем обеспечение абсолютно точного и объективного описания мишени. Ситуация усложняется необходимостью неравномерного облучения разных частей мишени. Именно в описании клинической (биологической) мишени сосредоточены основные трудности; без их преодоления достижение истинной конформности проблематично. Эта процедура в значительной степени зависит от опыта и знаний лучевого терапевта.

После определения геометрии мишени выполняется ее маркировка. Маркеры (костные ориентиры, несмываемые кожные метки, рентгеноконтрастные импланты в иммобилизационных устройствах) необходимы для правильного позиционирования пучков излучения на этапе лечения. Информация, полученная при топометрии, используется на втором этапе – дозно-анатомическом планировании. С помощью сложных компьютерных технологий строятся и сравниваются возможные планы облучения. Выбирается оптимальный план, обеспечивающий основную

задачу: доставку необходимой дозы во все части мишени при избирательной минимизации дозы в окружающих здоровых тканях. Выбранный план обычно проверяется экспериментально перед первым сеансом (дозиметрическая верификация).

Далее следует этап облучения пациента. Стандартный курс длится несколько недель, включает 24-36 сеансов (фракций). Суммарная доза в мишени составляет 60-70 Гр, подводится с нескольких направлений. Ограничивающим фактором (определяющим число фракций и направлений) является толерантность окружающих здоровых тканей. Важно отметить, что даже небольшое (15-20%) увеличение дозы в мишени существенно улучшает локальный контроль опухоли, поэтому задача повышения дозы в мишени при защите здоровых тканей всегда актуальна. Пациент облучается, лежа на спине, в той же позиции, что и при топометрии, с использованием индивидуального фиксирующего устройства.

Современные лучевые аппараты оснащены системами позиционирования: Лазерные центраторы создают систему координат (точки, линии, фигуры, обозначающие сечение пучка). Рентгеновские системы визуализации включают две трубки с детекторами, оси которых пересекаются под прямым углом (одна часто совпадает с осью терапевтического пучка). Оператор совмещает лазерные метки или рентгеновское изображение с маркерами пациента. Только точное позиционирование гарантирует выполнение плана и конформность облучения.

Все диагностические средства для топометрии ориентированы на лежащего пациента. Смена позиции (например, сидя) кардинально меняет взаиморасположение органов внутри зоны интереса, делая тщательно разработанный план неприменимым. Имобилизация и воспроизводимость позиции легче достигаются лежа, что критично при многократных сеансах.

Непроизвольные движения (дыхание, сердцебиение) упорядочены, позволяя синхронизировать моменты облучения и визуализации с их фазами. Этот проверенный временем подход определяет конструкцию всех современных диагностических (КТ, МРТ, ПЭТ, ОФЭКТ) и терапевтических установок (с вращающимся вокруг пациента источником).

Гарантия качества (ГК), основополагающий принцип современной лучевой терапии, определяет технологичность, надежность и результат лечения. Под гарантией качества понимается комплекс мер для точной доставки запланированной дозы к мишени при минимальной дозе в здоровых тканях и облучении персонала. Управление ГК включает аппаратные, программные, методические средства, административные и организационные мероприятия.

Во второй главе рассмотрены методы и аппаратура для лучевой терапии.

Проведен сравнительный анализ аппаратов для рентгенотерапии SENSUS SRT-100 и Xstrahl 300. Компании Sensus Healthcare и Xstrahl производят рентгеновские аппараты для поверхностной лучевой терапии, но их системы SRT-100 и Xstrahl 300 имеют различия в возможностях и технических характеристиках.

Sensus SRT-100 – это компактный аппарат, предназначенный в первую очередь для лечения базальноклеточного и плоскоклеточного рака кожи, а также келоидных рубцов. Он работает с низкоэнергетическими рентгеновскими лучами (до 100 кВ) и предлагает фиксированные глубины проникновения (до 5 мм), что делает его оптимальным для поверхностных поражений. Аппарат оснащен цифровым интерфейсом и автоматизированным позиционированием, что упрощает работу. Однако у

него нет системы визуализации для контроля в реальном времени, а диапазон энергий ограничен.

Xstrahl 300, напротив, обладает более широкими возможностями за счет регулируемых параметров излучения (до 300 кВ) и глубины проникновения до 30 мм, что позволяет лечить не только кожные опухоли, но и более глубокие поражения, включая некоторые случаи меланомы и костные метастазы. Важное преимущество – встроенная система визуализации (KV-изображения), позволяющая точно наводить луч и контролировать процесс облучения. Кроме того, Xstrahl 300 поддерживает разные фильтры и коллиматоры, что повышает гибкость лечения.

Оба аппарата неинвазивны и подходят для амбулаторного применения, но Xstrahl 300 – более универсальная система, подходящая для сложных случаев, тогда как SRT-100 лучше справляется с поверхностными поражениями и требует меньше места. Выбор между ними зависит от клинических задач: если нужна простота и экономичность, подойдет SRT-100, а если требуется расширенный функционал и контроль, предпочтительнее Xstrahl 300.

Проведен сравнительный анализ аппаратов гамма терапии Gamma Knife и TERABALT-100 ACS. Gamma Knife – это высокоточная система для стереотаксической радиохирургии головного мозга, использующая 201 источник кобальта-60, расположенных в сферической конструкции. Благодаря этому достигается точность до 0,15–0,3 мм, что делает его золотым стандартом для лечения артериовенозных мальформаций, невриноом, метастазов и других внутричерепных патологий. Однако его ключевое ограничение – узкая специализация: он не подходит для облучения опухолей вне черепа. Кроме того, процедура требует жесткой фиксации головы в стереотаксической рамке.

Terabalt 100 ACS – это кобальтовая терапевтическая установка, разработанная в Чехии (UJP Praha). В отличие от Gamma Knife, она использует один источник кобальта-60, но за счет подвижной системы коллиматоров и современного управления может применяться не только для глубокой гамма-терапии, но и для стереотаксических процедур. Ее точность (около 1–1,5 мм) ниже, чем у Gamma Knife, но достаточна для лечения опухолей мозга, а также легких, печени и костей. Важное преимущество – отсутствие необходимости в инвазивной фиксации и возможность фракционированного облучения.

Обе системы используют кобальт-60, но Gamma Knife – 201 источник, Terabalt – один. Точность у Gamma Knife: 0,15–0,3 мм (максимальная в мире). Точность у Terabalt: 1–1,5 мм (достаточно для большинства клинических задач).

Gamma Knife остается непревзойденным инструментом для сверхточной радиохирургии мозга, тогда как Terabalt – это более универсальная кобальтовая система, подходящая как для стереотаксии, так и для классической гамма-терапии различных локализаций. Выбор зависит от клинических задач: если нужна абсолютная точность для сложных внутричерепных поражений – Gamma Knife; если требуется гибкость и лечение разных типов опухолей – Terabalt.

Проведен сравнительный анализ линейных ускорителей Elekta и Varian. В современной радиационной онкологии линейные ускорители Elekta и Varian занимают лидирующие позиции, предлагая различные технологические решения для лучевой терапии. Обе компании разрабатывают оборудование уже несколько десятилетий, создавая конкурирующие продукты с уникальными характеристиками. Линейные ускорители Varian, представленные сериями TrueBeam, Edge и Trilogy, отличаются высокой мощностью дозового выхода (до 2400 MU/мин) и

широким набором опций для стереотаксической радиохирургии. Их система RapidArc позволяет выполнять объемно-модулированную дуговую терапию (VMAT) с высокой скоростью, обеспечивая точность до 0,5 мм. Особенностью аппаратов Varian является интегрированная система Respiratory Gating для отслеживания дыхательных движений, что особенно важно при облучении опухолей легких и других подвижных органов. Платформа Ethos представляет собой революционное решение для адаптивной терапии с искусственным интеллектом, способное перепланировать лечение в режиме реального времени.

Линейные ускорители Elekta, такие как Versa HD, Infinity и новейший Elekta Harmony, предлагают альтернативный подход к точной лучевой терапии. Аппараты Elekta оснащены уникальной системой Agility с 160-листовым мультилепестковым коллиматором, обеспечивающим высокую конформность облучения. Технология Monaco для планирования лечения включает сложные алгоритмы расчета дозы, особенно эффективные при протонной терапии. Отличительной чертой ускорителей Elekta является платформа Unity, сочетающая линейный ускоритель с МРТ-сканированием, что позволяет визуализировать мягкие ткани непосредственно во время сеанса облучения. Для позиционирования пациентов Elekta использует систему XVI Cone Beam CT, обеспечивающую точную навигацию. В области стереотаксической терапии аппараты Elekta предлагают решение с торговой маркой "Elekta Esprit", специализированное для лечения небольших опухолей с субмиллиметровой точностью.

При сравнении дозиметрических характеристик можно отметить, что ускорители Varian обычно демонстрируют более высокую мощность дозового выхода, что сокращает время сеанса, тогда как системы Elekta обеспечивают более точное конформное распределение дозы благодаря усовершенствованным коллиматорам. В области программного обеспечения

Varian предлагает комплексную платформу ARIA для управления всем процессом лучевой терапии, в то время как Elekta развивает систему Mosaic с акцентом на интеграцию различных диагностических и терапевтических модулей. Для контроля качества оба производителя предлагают собственные решения: Varian - систему Portal Dosimetry, Elekta - iViewGT. В последних моделях обе компании внедряют технологии искусственного интеллекта для автоматизации процессов планирования и верификации лечения, хотя подходы к реализации различаются.

С точки зрения клинического применения ускорители Varian чаще выбирают для крупных онкологических центров с большим потоком пациентов, где важна скорость обработки, тогда как системы Elekta популярны в клиниках, делающих акцент на сложных случаях, требующих особой точности. Оба производителя предлагают решения для всех основных видов лучевой терапии: IMRT, VMAT, SBRT, IGRT, но с разными техническими реализациями. Стоимость оборудования сопоставима, хотя общая стоимость владения может отличаться из-за различных требований к обслуживанию и эксплуатации. Перспективы развития обеих компаний связаны с дальнейшей интеграцией методов визуализации, искусственного интеллекта и возможностей адаптивной терапии, что продолжает стимулировать технологическую конкуренцию между этими лидерами рынка радиационной онкологии.

В третьей главе дана характеристики работы отдела медицинской физики в ГУЗ «Областной клинический онкологический диспансер». Отдел медицинской физики является самостоятельным структурным подразделением ГУЗ «ОКОД» и располагается в 4х лечебно-диагностических отделах (ЛДО), расположенных в г. Саратове, г. Энгельсе и г. Вольске. Отдел медицинской физики обслуживает радиотерапевтические отделения по всем

ЛДО. В учреждении стоят медицинские линейные ускорители фирмы Varian (рис.1). Медицинские физики умеют работать на всем имеющемся оборудовании для дистанционной лучевой терапии, контактной лучевой терапии, системах планирования и дозиметрическом оборудовании, которые установлены в трех ЛДО. Все сотрудники отдела взаимозаменяемы во всех подразделениях ГУЗ «ОКОД».



Рис. 1. Внешний вид линейного ускорителя электронов Varian

Дозиметрическое планирование лучевой терапии считается одним из наиболее сложных этапов лечения. Его ключевая цель и показатель эффективности заключаются в достижении максимальной дозы в зоне опухоли при минимальном воздействии на окружающие здоровые ткани,

особенно радиочувствительные. Результаты планирования визуализируются в виде набора изодозных кривых, отражающих распределение дозы.

Сегодня для этих задач применяются компьютерные системы с узкоспециализированным программным обеспечением, позволяющие напрямую импортировать топометрические данные в память компьютера. Использование мультимодальных методов визуализации — таких как МРТ, ПЭТ и КТ с контрастированием — повышает точность определения границ патологических структур при их контурировании (рис. 2). Это обеспечивает более корректное выделение целевой области и минимизацию ошибок при расчете доз.

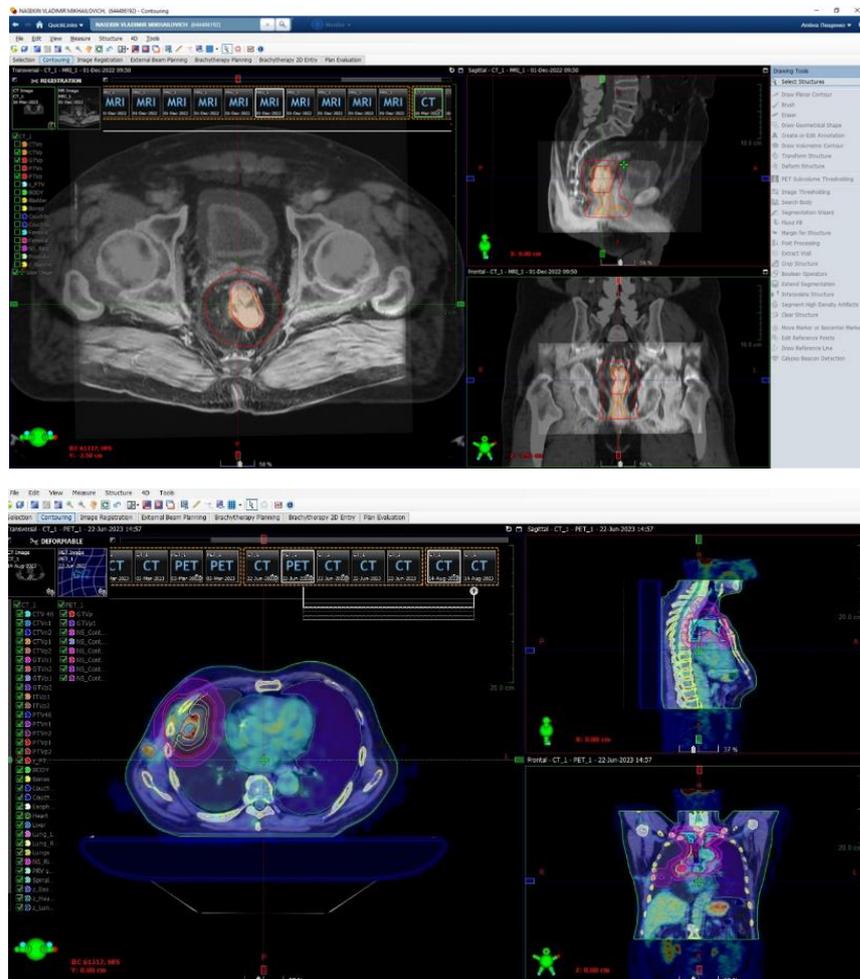


Рис.2. Наложение разных модальностей (МРТ, ПЭТ) изображений для оконтуривания целевой структуры и критических органов

Конечным результатом процесса планирования является серия двухмерных изодозных карт или единая объемная карта изодоз, совмещенных с соответствующими топометрическими изображениями в поле облучения. Для планирования 3D конформной лучевой терапии используется подход «обратного планирования» - методики с модуляцией интенсивности (IMRT, VMAT), позволяющим достичь еще большей конформности и гомогенности в объеме опухоли (рис.3, 4).

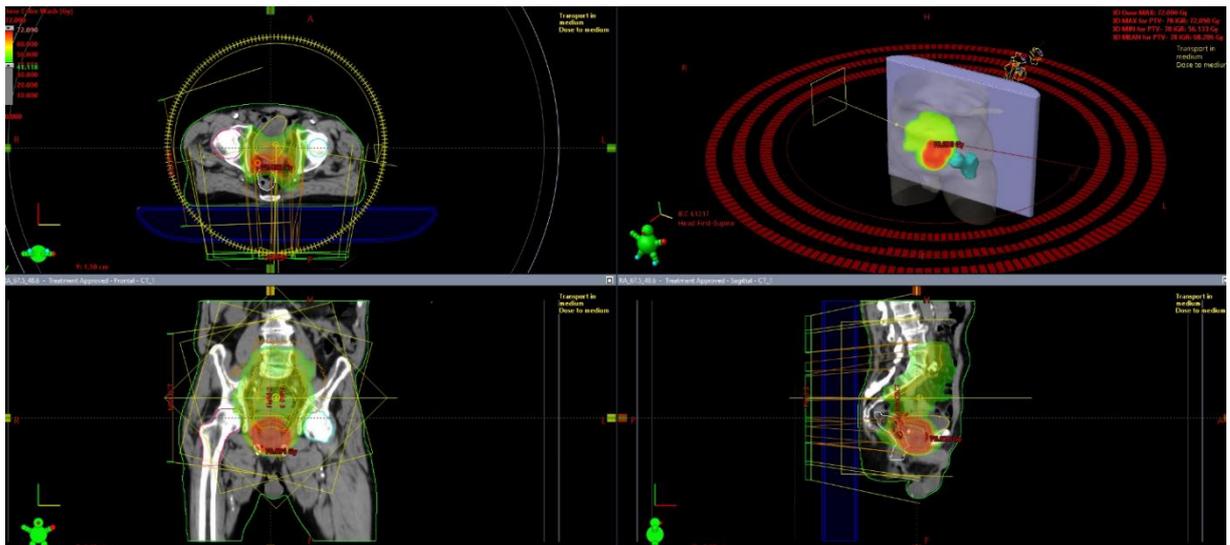


Рис. 3. Пример обратного планирования методикой VMAT.

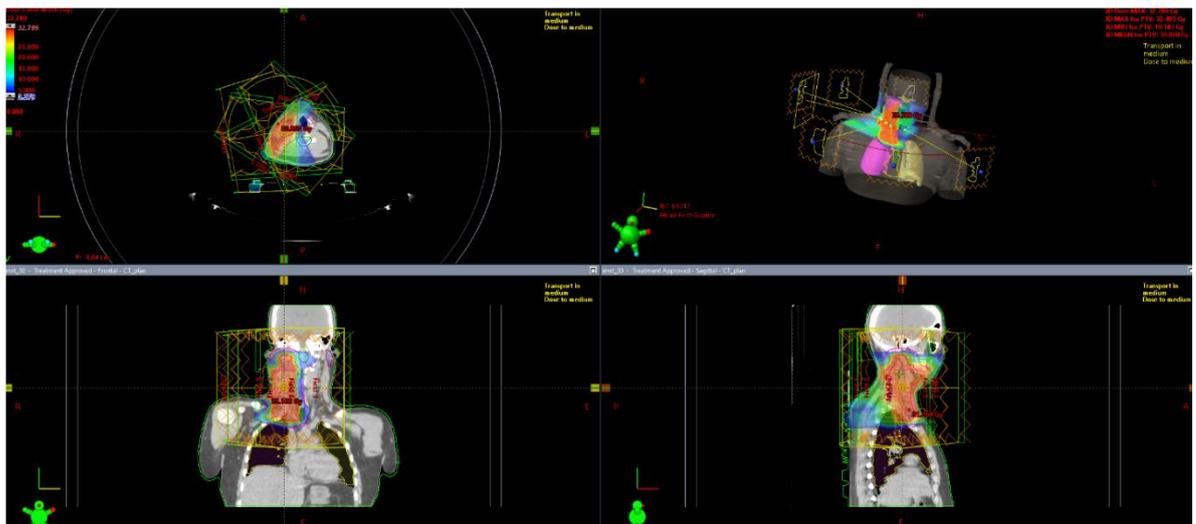


Рис. 4. Пример обратного планирования методикой IMRT.

Распределение сгенерированных доз облучения оценивается с помощью 2D изодозных линий, наложенных на КТ-изображения и гистограмм доза-объем. Распределение планируемых доз подтверждается радиотерапевтом для планируемых объемов облучения (например, +7% и -5% от предписанной дозы) и для критических структур с их порогами толерантности, ограничениями абсолютного максимума дозы и дозо-объемных ограничений.

В конечном счете, выбор плана облучения является поиском компромисса между дозой, доставляемой к целевым объемам и дозами на различные органы риска.

Перед сеансом лечения проводится верификация плана в тестовом режиме, медицинскими физиками проводится проверка сходимости запланированного лечения (рис.5). Как только план проверен, он отправляется в лечебный зал. Далее положение пациента на лечебном столе проверяется с помощью системы портальной визуализации (Portal Vision) – так называемая, лучевая терапия с контролем по изображению (Image-guided radiation therapy, IGRT).

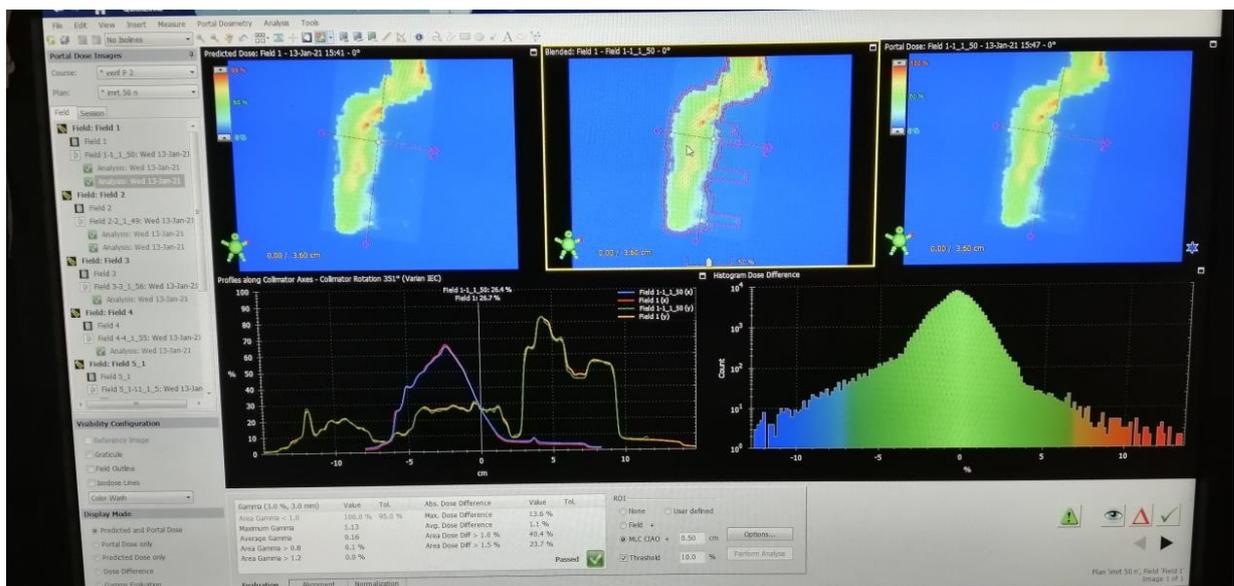


Рис. 5. Портальная верификация лечебных планов на сходимость

В новых аппаратах Halcyon верификация укладки делается в конусном пучке СВСТ. После этого производится собственно облучение с постоянным наблюдением за состоянием больного по системе видеонаблюдения (рис.6).



Рис. 6. Визуализация укладки пациента перед лечением

Процедура лечения проводится на аппарате Halcyon - это аппарат туннельного типа с широкой апертурой гентри (рис.7).



Рис. 7. Внешний вид линейного ускорителя электронов Varian Halcyon

Сейчас усовершенствованы высокотехнологичные современные методики с объемной модуляцией интенсивности потока фотонов VMAT (ротационное облучение с модуляцией мощности дозы), IMRT (3D-конформное облучение с модуляцией интенсивности). Применение для существующих методик систем, повышающих точность отдачи планов на ускорителе: IGRT – облучение с визуальным контролем, который достигался использованием EPID (Electronic Portal Image device) или СВСТ.

Заключение. Основные результаты работы.

В современной радиационной онкологии существует широкий спектр оборудования для различных видов лучевой терапии, каждый из которых обладает уникальными характеристиками и областями применения. Аппарат близкофокусной рентгенотерапии SENSUS SRT-100 специализируется на лечении поверхностных кожных поражений, работая в диапазоне 50-100 кВ с глубиной проникновения до 5 мм, что делает его идеальным для базальноклеточного и плоскоклеточного рака кожи. В отличие от него, аппарат глубокой рентгенотерапии Xstrahl 300 предлагает более мощное излучение до 300 кВ с глубиной проникновения до 30 мм, позволяя лечить не только кожные поражения, но и поверхностно расположенные опухоли внутренних органов, а также оснащен системой визуализации для точного наведения.

Гамма-терапевтические аппараты представляют отдельный класс оборудования. Gamma Knife, использующий 201 источник кобальта-60, является золотым стандартом для стереотаксической радиохирургии головного мозга с непревзойденной точностью до 0,3 мм, но ограничен только внутричерепными применениями. Его российский аналог TERABALT-100 ACS, также использующий кобальт-60, демонстрирует более универсальные возможности благодаря подвижной системе коллиматоров, позволяя проводить как стереотаксические вмешательства с точностью 1-1,5 мм, так и глубокую гамма-терапию для опухолей различной локализации, включая легкие, печень и костные структуры.

Современные линейные ускорители предлагают принципиально иные технологические решения. Система Varian TrueBeam сочетает возможности стереотаксической лучевой терапии и высокоточной радиохирургии, обеспечивая высокую энергию излучения 10 МэВ и точность

позиционирования до 0,5 мм. Ее ключевые преимущества - технология RapidArc для объемно-модулированной дуговой терапии и интегрированная система Respiratory Gating для учета дыхательных движений. Линейный ускоритель Elekta SynergyS отличается уникальной комбинацией с системой визуального контроля, включающей конусно-лучевую КТ и возможность интеграции с МРТ-наведением в платформе Unity, что особенно ценно при облучении опухолей с плохой КТ-контрастностью.

Сравнивая дозиметрические характеристики, аппараты на основе кобальта-60 (Gamma Knife и TERABALT) обеспечивают более стабильное энергетическое распределение, тогда как линейные ускорители (TrueBeam и SynergyS) предлагают более гибкое формирование поля облучения. По точности позиционирования Gamma Knife сохраняет лидерство для внутричерепных вмешательств, в то время как TrueBeam демонстрирует лучшие результаты при экстракраниальных локализациях. Аппараты SRT-100 и Xstrahl 300 используются для поверхностной терапии.

Таким образом, в ходе выполнения магистерской работы проведен сравнительный анализ аппаратов рентгенотерапии: SENSUS SRT-100 и Xstrahl 300. Проведен сравнительный анализ гамма-терапевтических аппаратов: Gamma Knife и TERABALT-100 ACS. Проведен сравнительный анализ линейных ускорителей Varian TrueBeam и Elekta SynergyS. Дана характеристика работы отдела медицинской физики ГУЗ «Областной клинический онкологический диспансер».

Библиографический список

1. Ahmad, S.S., Duke, S., Jena, R., Williams, M.V. and Burnet, N.G., 2012. Advances in radiotherapy. *Bmj*, 345.
2. Tariq, U.B., Khan, M.N., Barkha, F.N.U., Sagar, R.S., Suchwani, D., Abdelsamad, O., Bhatt, D., Shakil, G., Rasool, S., Subedi, S. and Versha, F.N.U., 2024. Comparative analysis of stereotactic radiation therapy and conventional radiation therapy in cancer pain control: a systematic review and meta-analysis. *Clinical Oncology*, 36(7), pp.452-462.
3. Staffurth J. A review of the clinical evidence for intensity-modulated radiotherapy. *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 2010;22:643-57.
4. Hall EJ, Wu CS. Radiation-induced second cancers: the impact of 3D-CRT and IMRT. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2003;56:83-8
5. 18.Nutting CM, Morden JP, Harrington KJ, Urbano TG, Bhide SA, Clark C, Parotid-sparing intensity modulated versus conventional radiotherapy in head and neck cancer (PARSPORT): a phase 3 multicentre randomised controlled trial. *Lancet Oncol* 2011;12:127-36.
6. Staffurth J. A review of the clinical evidence for intensity-modulated radiotherapy. *Clin Oncol (R Coll Radiol)* 2010;22:643-57.
7. Sierko E, Hempel D, Zuzda K, Wojtukiewicz MZ. Personalized Radiation Therapy in Cancer Pain Management. *Cancers* 2019; 19:390
8. Guckenberger M, Mantel F, Sweeney RA, Hawkins M, Belderbos J, Ahmed M, Long-Term Results of Dose-Intensified Fractionated Stereotactic Body Radiation Therapy (SBRT) for Painful Spinal Metastases. *Int J Radiat Oncol Biol Phys* 2021;110:348e357.
9. Mohan, R., 2022. A review of proton therapy—Current status and future directions. *Precision radiation oncology*, 6(2), pp.164-176.

10. Закирова, Э.С., 2021. ГАММА-НОЖ-СОВРЕМЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ДОСТИЖЕНИЕ. Наука и образование сегодня, (6 (65)), pp.63-67.
11. Goetsch S. J., Xu A. Y. Gamma Knife®. Radiochromic Film. CRC Press, 2017. С. 185-201.
12. Kilby W. A technical overview of the CyberKnife system. Handbook of robotic and image-guided surgery. 2020. С. 15-38.
13. Schulz-Ertner D, Tsujii H. Particle radiation therapy using proton and heavier ion beams. J Clin Oncol 2007;25:953-64.
14. Allen AM, Pawlicki T, Dong L, Fourkal E, Buyyounouski M, Cengel K, An evidence based review of proton beam therapy: the report of ASTRO's emerging technology committee. Radiother Oncol 2012;103:8-11.
15. Brodin NP, Vogelius IR, Maraldo MV, Munck Af Rosenschold P, Aznar MC, Kiil-Berthelsen A, Life years lost-comparing potentially fatal late complications after radiotherapy for pediatric medulloblastoma on a common scale. Cancer 2012;118:5432-40.
16. DeLaney TF. Proton therapy in the clinic. Front Radiat Ther Oncol 2011;43:465-85.
17. Bortfeld T. IMRT: a review and preview . Physics in Medicine & Biology. 2006. Т. 51. №. 13. С. R363.
18. Zelefsky M. J. Clinical experience with intensity modulated radiation therapy (IMRT) in prostate cancer . Radiotherapy and Oncology. 2000. Т. 55. №. 3. С. 241-249.
19. Otto K. Volumetric modulated arc therapy: IMRT in a single gantry arc . Medical physics. 2008. Т. 35. №. 1. С. 310-317.
20. Ostheimer C. Dosimetric comparison of intensity-modulated radiotherapy (IMRT) and volumetric modulated arc therapy (VMAT) in total scalp

- irradiation: a single institutional experience . Radiation oncology journal. 2016. Т. 34. №. 4. С. 313.
- 21.Nasser N. Initial plan quality evaluation using a novel ai-driven planning system and paradigm for adaptive head and neck patients . International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics. 2021. Т. 111. №. 3. С. e97.
- 22.Harrison K. Machine learning for auto-segmentation in radiotherapy planning . Clinical Oncology. 2022. Т. 34. №. 2. С. 74-88.
- 23.Isaksson L. J. Machine learning-based models for prediction of toxicity outcomes in radiotherapy . Frontiers in oncology. 2020. Т. 10. С. 790.
- 24.Winkel D. Adaptive radiotherapy: the Elekta Unity MR-linac concept . Clinical and translational radiation oncology. 2019. Т. 18. С. 54-59.
- 25.Li W. Fraction optimization for hybrid proton-photon treatment planning . Medical physics. 2023. Т. 50. №. 6. С. 3311-3323.
- 26.Кленов Г. И., Хорошков В. С. Адронная лучевая терапия: история, статус, перспективы //Успехи физических наук. – 2016. – Т. 186. – №. 8. – С. 891-911.
- 27.Завадовская В.Д., Куражов А.П., Пыжова И.Б. Лучевая терапия: учебное пособие . Томск : СибГМУ, 2013. 104 с.

