

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-1-198-206>  
УДК 615.849.5:614.876:616-006.6

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ОРГАННЫХ ДОЗ ПРИ 3D-CRT, IMRT И VMAT В СООТВЕТСТВИИ С ПРОТОКОЛАМИ QUANTEC И RTOG: ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ, ПРЕИМУЩЕСТВА И ОГРАНИЧЕНИЯ

**А. Д. Мергенбаева, С. З. Танатаров, М. Т. Идинов, Л. Б. Кенжина\*, Б. Ж. Атангаева, С. М. Айткалиев, А. Д. Алибекова, А. Д. Тусупова, Н. А. Елемесова, Е. О. Сабеков**

*КГП «Центр ядерной медицины и онкологии» УЗ области Абай, Семей, Казахстан*

\* E-mail для контактов: [laurakenzhina@yandex.kz](mailto:laurakenzhina@yandex.kz)

Исследование выполнено на базе Центра ядерной медицины и онкологии (г. Семей) и посвящено сравнительному дозиметрическому анализу параметров планирования дистанционной лучевой терапии при местно-распространённом раке шейки матки. Проведено сопоставление трёхмерной конформной лучевой терапии (3D-CRT), лучевой терапии с модуляцией интенсивности (IMRT) и объёмно-модулированной дуговой терапии (VMAT) с точки зрения качества дозовых распределений и дозовой нагрузки на органы риска. Планирование выполнено для 25 пациенток с использованием линейного ускорителя TrueBeam с ежедневной верификацией укладки на основе IGRT/CBCT. Качество планов оценивали по данным дозово-объёмных гистограмм с использованием параметров D95% для PTV, индексов конформности (CI) и гомогенности (HI), а также абсолютных дозовых характеристик (Dmean, Dmax) для органов риска в сопоставлении с рекомендациями протоколов RTOG и QUANTEC. Анализ показал, что методика VMAT продемонстрировала наилучшие дозиметрические показатели с высоким индексом конформности  $CI = 1,03 \pm 0,02$  и низким индексом гомогенности  $HI = 0,09 \pm 0,02$ , обеспечивая более равномерное и точное покрытие PTV по сравнению с IMRT и 3D-CRT. Ключевым результатом стало существенное снижение дозовой нагрузки на органы риска малого таза: при использовании VMAT суммарное снижение дозы составило в среднем 25–30% относительно 3D-CRT, при этом средняя доза на прямую кишку (Dmean) снизилась до 33,0 Гр. Дополнительным преимуществом VMAT явилось сокращение среднего времени сеанса облучения до 5–7 минут, что снижает риск внутрифракционных смещений. Полученные данные подтверждают дозиметрические преимущества VMAT и обосновывают целесообразность её применения в условиях регионального онкологического центра.

**Ключевые слова:** рак шейки матки, дистанционная лучевая терапия, дозовое планирование, 3D-CRT, IMRT, VMAT, дозовое распределение, органы риска, индекс конформности, QUANTEC, RTOG.

### ВВЕДЕНИЕ

Рак шейки матки (РШМ) остаётся значимой глобальной проблемой общественного здравоохранения. Согласно мировым статистическим данным, это одно из наиболее распространённых онкологических заболеваний среди женского населения, особенно в развивающихся странах [1]. Для Казахстана РШМ также является одним из приоритетных направлений в онкогинекологии, где наблюдается устойчивая потребность в совершенствовании методов диагностики и, что критически важно, – лечения. Лучевая терапия (ЛТ) занимает центральное место в лечении местно-распространённых форм РШМ, часто применяясь в сочетании с химиотерапией [2]. Однако анатомическая сложность малого таза является главной проблемой: необходимость подведения к опухоли радикальной дозы при максимальной минимизации облучения окружающих тканей. Традиционная трёхмерная конформная лучевая терапия (3D-CRT) нередко демонстрирует недостаточную конформность распределения дозы, что ограничивает её применение при сложной геометрии мишени. В ответ на это радиационная онкология внедрила передовые технологии: лучевую терапию с модуляцией интенсивности (IMRT) и объёмно-модулированную ротационную терапию (VMAT). Эти методики позволяют ди-

намически модулировать интенсивность пучка, обеспечивая формирование сложных дозовых полей, которые максимально конформно (точно по форме) облегают планируемый объём мишени (PTV) [3].

С точки зрения радиационной биофизики и медицинской физики, лечение опухолей малого таза относится к числу наиболее сложных задач лучевой терапии вследствие выраженной анатомической вариативности, близкого расположения радиочувствительных органов и высокой подвижности внутренних структур. Даже незначительные отклонения в дозовом распределении или геометрии подведения дозы могут приводить к превышению толерантности органов риска и увеличению вероятности поздних лучевых осложнений. В этой связи оптимизация дозового планирования рассматривается как ключевой фактор повышения терапевтического индекса – соотношения между вероятностью локального контроля опухоли и риском радиационно-индуцированных повреждений нормальных тканей [4, 5].

Клинический контроль качества и безопасности этих высокотехнологичных планов осуществляется путём тщательного анализа дозово-объёмных гистограмм (ДВО), которые являются основным инструментом для количественной оценки дозового распределения. Именно через ДВО проводится сравнение

конкретных дозиметрических параметров: для PTV оцениваются такие показатели, как D95% (доза, полученная 95% объёма мишени), а также индексы конформности (CI) и гомогенности (HI). Для органов риска анализ фокусируется на параметрах, прогнозирующих токсичность, в первую очередь, на объёме, получившем критическую дозу ( $V_{xGr}$ ), например,  $V_{40Gr}$  для тонкого кишечника и  $V_{60Gr}$  или  $V_{50Gr}$  для прямой кишки, а также на средней дозе ( $D_{mean}$ ) для таких структур, как тонкий кишечник [6]. Для обеспечения единообразия и безопасности планирования используются строгие международные протоколы, устанавливающие лимиты этих параметров: RTOG (Radiation Therapy Oncology Group) и QUANTEC (Quantitative Analysis of Normal Tissue Effects in the Clinic) [7]. Следует отметить, что, несмотря на наличие международных рекомендаций QUANTEC и RTOG, оптимальные дозиметрические параметры во многом зависят от конкретной клинической реализации, характеристик линейного ускорителя, используемой системы планирования и уровня интеграции средств визуального контроля. Ряд исследований подчёркивает, что результаты, полученные в условиях высокоспециализированных центров, не всегда могут быть напрямую экстраполированы на региональные онкологические учреждения без учёта их технических и организационных особенностей [8]. Несмотря на наличие значительного числа международных публикаций, посвящённых сравнению методик 3D-CRT, IMRT и VMAT, данные, полученные в условиях региональных онкологических центров с ограниченными ресурсами и специфической клинической нагрузкой, остаются недостаточно представленными. В этом контексте проведение локального сравнительного дозиметрического анализа приобретает особую значимость, поскольку позволяет оценить воспроизводимость заявленных преимуществ современных методик в реальных условиях клинической практики и адаптировать международные рекомендации к национальной системе здравоохранения. Таким образом, целью настоящего исследования является проведение сравнительного дозиметрического анализа дозовых распределений и органных доз, полученных при планировании лучевой терапии РШМ по методикам 3D-CRT, IMRT и VMAT, с оценкой их соответствия критериям клинических протоколов RTOG и QUANTEC. Для достижения этой цели были поставлены задачи: определить различия в конформности и гомогенности дозы в PTV; сравнить ключевые дозово-объёмные параметры органов риска таза, и сформулировать обоснованные рекомендации по выбору оптимальной техники планирования для минимизации лучевых осложнений.

В связи с вышеизложенным представляется актуальным проведение сравнительного анализа современных методик лучевой терапии в условиях клинической практики. Гипотезой настоящего исследования является предположение о том, что

применение VMAT по сравнению с IMRT и 3D-CRT обеспечивает более благоприятные дозиметрические характеристики, выражающиеся в улучшении параметров покрытия PTV и снижении интегральной дозовой нагрузки на органы риска при лечении рака шейки матки. Непрерывное развитие технологий лучевой терапии требует жёсткого контроля качества и обеспечения безопасности, что регулируется международными организациями. В этом контексте особую актуальность приобретают публикации Международного агентства по атомной энергии [9], устанавливающие строгие критерии точности и неопределённости дозиметрии (например, IAEA Human Health Series No. 31). Применение этих международных критериев в Казахстане, особенно в Центре ядерной медицины, не только подтверждает соответствие мировым стандартам, но и подчёркивает значимость и воспроизводимость результатов настоящего исследования в более широком научном контексте.

#### **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ**

Данное дозиметрическое исследование было выполнено на базе Центра ядерной медицины и онкологии области Абай и основывается на анализе планов облучения 25 пациенток с местно-распространённым раком шейки матки (РШМ), соответствующих стадиям IB2–IVA согласно последней редакции FIGO (Международной федерации акушерства и гинекологии, между International Federation of Gynecology and Obstetrics). Данный диапазон стадий был выбран как наиболее клинически релевантный, поскольку именно для этих пациенток химиолучевая терапия является основным методом радикального лечения [10]. Актуальность анализа подчёркивается стабильным потоком таких пациентов в клинике – в среднем, более 20 случаев РШМ в год, что требует постоянной оптимизации локальных протоколов для соответствия мировым стандартам. Все клинические случаи планировались на специализированной системе Eclipse (Varian Medical Systems, версия 18), а доставка дозы обеспечивалась современным линейным ускорителем TrueBeam, оснащённым многолепестковым коллиматором (MLC) и использующим фотонное излучение 6 МэВ. Стандартное дозовое предписание для всех планов составило: суммарная очаговая доза (СОД) 45 Гр, разовая очаговая доза (РОД) 1,8 Гр на PTV, всего 25 фракций. Для обеспечения сопоставимости плана все методики рассчитывались единым алгоритмом AAA-18.0.1, поскольку использование разных алгоритмов может приводить к систематическим различиям в моделировании дозы. Перед проведением КТ-симуляции всем пациенткам проводилась индивидуальная иммобилизация для обеспечения воспроизводимости укладки, что является фундаментом для прецизионного облучения. Рабочий интерфейс программного обеспечения представлен на рисунке 1.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ОРГАНЫХ ДОЗ ПРИ 3D-CRT, IMRT И VMAT В СООТВЕТСТВИИ С ПРОТОКОЛАМИ QUANTEC И RTOG...

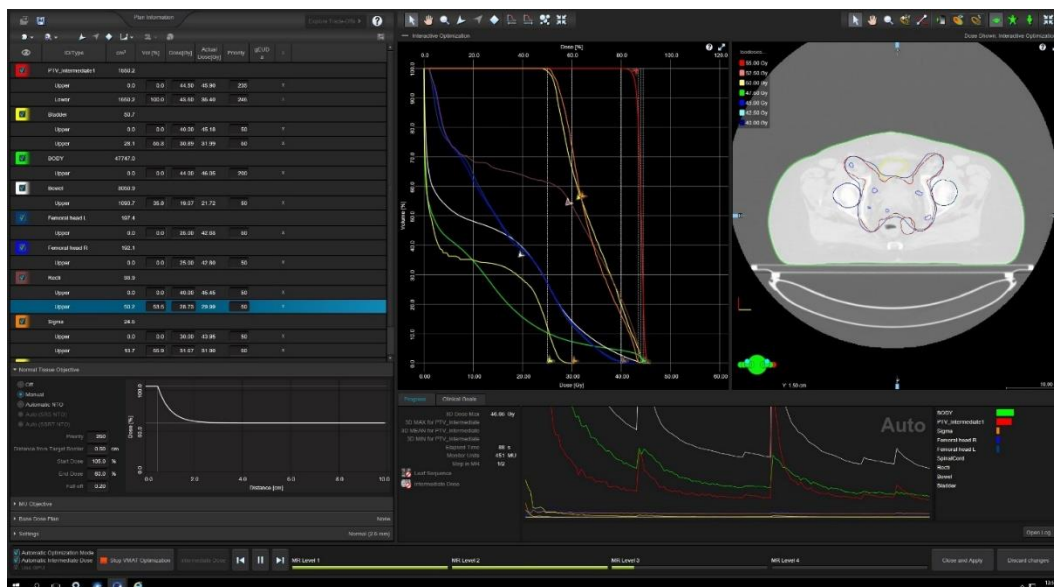


Рисунок 1. Интерфейс системы планирования Eclipse версии 18 (Varian Medical Systems)

**Eclipse 18** (Varian Medical Systems) – высокотехнологическая система для формирования индивидуальных планов лучевой терапии на основе трёхмерных анатомических данных и дозиметрических моделей. Версия 18 включает улучшенные алгоритмы оптимизации дозы, расширенную автоматизацию и точное моделирование взаимодействия излучения с тканями.

Ключевые усовершенствования Eclipse 18 включают **RapidArc Dynamic** для динамической настройки пучка при VMAT/IMRT и **Enhanced Leaf Modeling** для точного расчёта движений многолепесткового коллиматора в SRS/SBRT. Система поддерживает современные методики лечения и использует **план** с многокритериальной оптимизацией для повышения качества и воспроизводимости планов **Eclipse 18** повышает точность планирования, ускоряет подготовку лечения и улучшает защиту органов риска, обеспечивая индивидуализированный подход и высокую воспроизводимость планов [11].

Процесс планирования носит сугубо междисциплинарный характер и начинается с клинического предписания радиотерапевта. Врач, исходя из данных диагностики (КТ, МРТ) и гистологии, выполняет критически важный этап контурирования: определяет границы опухоли (GTV), клинического объёма мишени (CTV) и, соответственно, планируемого объёма мишени (PTV), добавляя к CTV изотропный припуск 5–7 мм. Одновременно с этим скрупулезно очерчиваются органы риска таза – прямая кишка, мочевой пузырь, общий объем тонкого кишечника и головки бедренных костей. Радиотерапевт также задаёт СОД (суммарную очаговую дозу, 45 Гр) и РОД (разовую очаговую дозу, 1,8 Гр), а главное – устанавливает строгие дозовые ограничения для органов риска, руководствуясь клиническими приоритетами и

рекомендациями RTOG и QUANTEC, например, требуя, чтобы объем тонкого кишечника, получивший Dmean, не превышал 30 Гр, или чтобы V<sub>50Gr</sub> для прямой кишки оставался в допустимых пределах. Далее медицинский физик принимает эти контуры и предписания как исходные данные и приступает к разработке трёх конкурирующих планов для каждого пациента. Последовательность планирования критична для обеспечения объективности сравнения. Сначала создавался план 3D-CRT с использованием 4–6 фиксированных полей (forward planning) и прямого планирования. Затем разрабатывались планы с обратным планированием (inverse planning): IMRT (7–9 фиксированных полей) и VMAT (две полные или частичные дуги). Процесс разработки планов IMRT и VMAT включал настройку целевых функций и весовых коэффициентов в системе Eclipse для достижения заданных дозиметрических критериев в соответствии с протоколами, нацеленными на достижение максимально конформного облучения PTV при агрессивном снижении дозы в органах риска. Ключевое различие заключается в том, что при VMAT алгоритм оптимизирует не только интенсивность сегментов, но и скорость гентри и MLC, позволяя достичь лучшего дозового градиента, что особенно важно в сложной анатомии таза.

Финальный этап включает дозиметрическую оценку, которая является основой для сравнения. Главным инструментом здесь выступает анализ дозово-объёмных гистограмм. Для PTV оценивается равномерность и точность покрытия через: индекс конформности (CI) – показатель точности соответствия предписанной изодозы объёму мишени (идеально 1,0); индекс гомогенности (HI) – показатель равномерности дозы внутри PTV (идеально 1,0) и D<sub>95%</sub>.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ОРГАНЫХ ДОЗ ПРИ 3D-CRT, IMRT И VMAT В СООТВЕТСТВИИ С ПРОТОКОЛАМИ QUANTEC И RTOG...

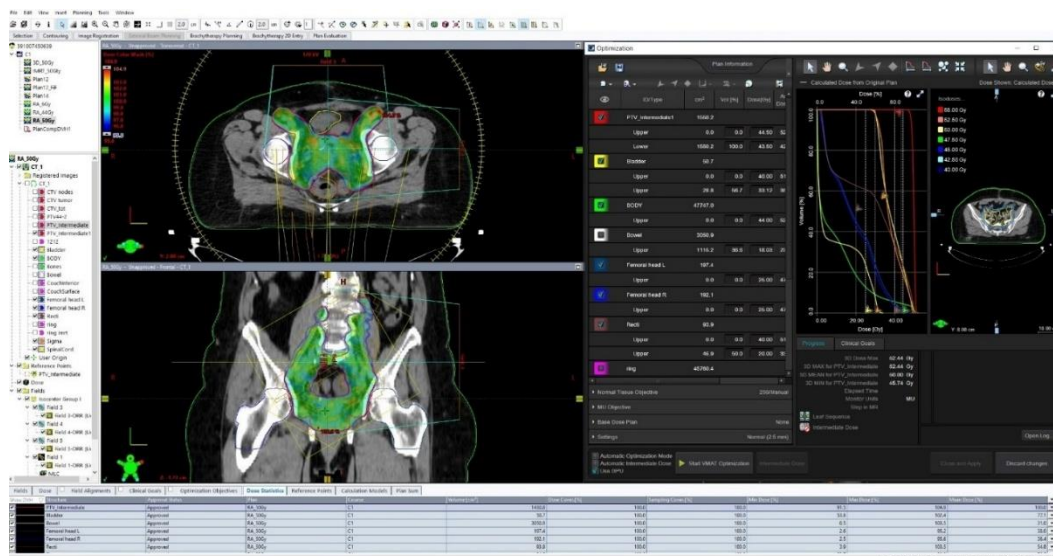


Рисунок 2. Пример экранов планирования IMRT и VMAT

Таблица 1. Сравнительный анализ дозиметрических показателей PTV и операционных факторов (средние значения, N=25)

Параметр	3D-CRT	IMRT	VMAT (RapidArc)	P-value*	Преимущество
Индекс конформности (CI), сред.	1,12±0,05	1,05±0,03	1,03±0,02	< 0,001	VMAT
Индекс гомогенности (HI), сред.	0,15±0,04	0,10±0,03	0,09±0,02	< 0,05	VMAT
D <sub>95%</sub> PTV (от предписанной дозы, %)	≈ 95,0%	≈ 98,0%	≈ 99,0%	< 0,05	VMAT
Время облучения (среднее, мин)	8–10	12–15	5–7	< 0,01	VMAT
Общее снижение нагрузки на органы риска (ср. снижение дозы)	базовое	–15% (от 3D-CRT (среднее значение))	–25–30% (относительно 3D-CRT (среднее значение))	< 0,001	VMAT

\*Примечание: p-value рассчитано с использованием критерия Фридмана; различия признаны статистически значимыми при p < 0,05.

Для органов риска сравнение фокусируется на ключевых дозово-объемных параметрах ( $V_{xGr}$ ), которые напрямую связаны с прогнозом токсичности. Наконец, для подтверждения воспроизводимости и безопасности доставки всех высококонформных планов использовалась система IGRT (Image Guided Radiation Therapy) с ежедневной СВСТ (конусно-лучевой компьютерной томографией), что обеспечило верификацию изоцентра и коррекцию укладки, учитывая смещение внутренних органов таза, таких как наполнение мочевого пузыря или движение петель кишечника.

Статистическая обработка данных проводилась с использованием методов описательной статистики. Для дозиметрических параметров рассчитывались средние значения и стандартные отклонения; сравнение показателей между методиками 3D-CRT, IMRT и VMAT выполнялось с использованием дисперсионного анализа для связанных выборок (ANOVA), различия считались статистически значимыми при  $p < 0,05$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный дозиметрический анализ подтвердил выраженную зависимость качества дозового распределения от используемой методики облучения. Было установлено, что методики с модуляцией ин-

тенсивности обеспечивают значительное улучшение конформности и гомогенности дозы в PTV, при этом демонстрируя существенное снижение дозовой нагрузки на окружающие опухоль органы риска. Все представленные данные являются усредненными показателями для всех 25 пациенток, что обеспечивает корректность сравнительного анализа, и статистическую надежность выводов. Сравнительные данные по PTV, отражающие качество покрытия и операционную эффективность, приведены в таблице 1.

Как представлено в таблице 1, VMAT достигает наилучшего CI ( $1,03 \pm 0,02$ ), что свидетельствует о минимальном облучении здоровых тканей за пределами мишени, и наименьшего HI ( $0,09 \pm 0,02$ ), что является прямым доказательством гомогенного распределения дозы [12]. Значительно худшие показатели 3D-CRT (CI = 1,12, HI = 0,15) подтверждают, что ограниченные возможности фиксированных пучков не позволяют эффективно справиться со сложной, вогнутой формой PTV в малом тазу. Кроме того, VMAT продемонстрировала значительное операционное преимущество, сократив среднее время сеанса до 5–7 минут. Это критический фактор, поскольку сокращение времени сеанса потенциально снижает вероят-

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДОЗОВЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ И ОРГАНЫХ ДОЗ ПРИ 3D-CRT, IMRT И VMAT  
В СООТВЕТСТВИИ С ПРОТОКОЛАМИ QUANTEC И RTOG...**

ность внутрифракционных смещений, которые могут критически повлиять на точность доставки дозы.

Проведенный статистический анализ выявил достоверные различия между рассматриваемыми методиками по основным дозиметрическим показателям ( $p < 0,05$ ), что свидетельствует о более благоприятных характеристиках распределения дозы при использовании технологий модуляции интенсивности, особенно VMAT, по сравнению с 3D-CRT. В рамках сравнительного анализа была проведена оценка дозовой нагрузки на ключевые органы риска малого таза с использованием критериев, рекомендованных международными клиническими протоколами RTOG и QUANTEC. Эти рекомендации широко применяются в современной радиотерапии для оценки безопасности планов лечения и прогнозирования вероятности лучевой токсичности. Для повышения наглядности интерпретации полученных результатов дозиметрические показатели представлены отдельно в соответствии с каждой системой рекомендаций. Такой подход позволяет сопоставить фактические значения дозовой нагрузки с клинически принятыми ограничениями для основных органов риска малого таза – прямой кишки, мочевого пузыря, тонкого кишечника, головок бедренных костей и спинного мозга – и тем самым обеспечить более объективную оценку безопасности различных методик планирования. Результаты сравнительного анализа дозовой нагрузки для техник 3D-CRT, IMRT и VMAT представлены в таблице 2.

Как следует из данных таблицы 2, переход от традиционной техники 3D-CRT к методам модулированной лучевой терапии сопровождается систематическим снижением дозовой нагрузки на критические структуры малого таза. Наиболее выраженный дозиметрический выигрыш наблюдается для органов желудочно-кишечного тракта, прежде всего прямой кишки и тонкого кишечника, которые рассматриваются как лимитирующие органы риска при лучевой терапии данной анатомической области. Для прямой

кишки значения дозовой нагрузки при использовании VMAT составили 26,5 Гр по критерию RTOG и 33,0 Гр по критерию QUANTEC, тогда как при 3D-CRT соответствующие показатели достигали 49,6 Гр и 45,9 Гр. Сходная закономерность отмечена для тонкого кишечника, где переход к VMAT позволил снизить дозовую нагрузку до 26,8 – 34,9 Гр по сравнению с 30,9–48,5 Гр при 3D-CRT.

Снижение дозы на структуры желудочно-кишечного тракта сопровождается аналогичной тенденцией и для других органов риска малого таза. Для мочевого пузыря и головок бедренных костей при использовании техник модулированной лучевой терапии также отмечается более благоприятное распределение дозы по сравнению с традиционным трёхмерным планированием, что свидетельствует о более эффективном пространственном перераспределении дозы в пределах облучаемого объема. Дополнительным показателем повышения дозиметрической безопасности является уменьшение максимальной дозы на спинной мозг: при VMAT значение  $D_{max}$  составило 33,4 Гр, тогда как при 3D-CRT оно достигало 49,3 Гр, приближаясь к пределам толерантности данного органа.

Таким образом, применение IMRT и особенно VMAT обеспечивает более благоприятное распределение дозы по сравнению с техникой 3D-CRT, позволяя снизить нагрузку на критические структуры без ухудшения покрытия мишени. Подобная оптимизация дозового распределения рассматривается как важный фактор уменьшения вероятности развития лучевой токсичности [5]. Реализация преимуществ высококонформных методик требует высокой геометрической точности лечения, которая в настоящем исследовании обеспечивалась системой IGRT с ежедневной СВСТ-верификацией, компенсирующей возможные внутрифракционные смещения органов малого таза [13].

Таблица 2. Сравнение дозовой нагрузки\* на ключевые органы риска (средние значения, N=25)

Орган риска	Критерий (RTOG/QUANTEC)	3D-CRT (среднее значение)	IMRT (среднее значение)	VMAT (среднее значение)
Прямая кишка по RTOG	$V_{60\text{Гр}} \leq 30\%$	49,6 Гр	29,0 Гр	26,5 Гр
Прямая кишка по QUANTEC	$V_{50\text{Гр}} \leq 50\%$	45,9 Гр	33,1 Гр	33,0 Гр
Мочевой пузырь по RTOG	$V_{45\text{Гр}} \leq 35\%$	50 Гр	41,3 Гр	38 Гр
Мочевой пузырь по QUANTEC	$V_{50\text{Гр}} \leq 65\%$	50 Гр	37,9 Гр	37,4 Гр
Тонкий кишечник по RTOG	$V_{40\text{Гр}} \leq 30\%$	30,9 Гр	27,5 Гр	26,8 Гр
Тонкий кишечник по QUANTEC	$V_{50\text{Гр}} \leq 50\%$	48,5 Гр	35,8 Гр	34,9 Гр
Левая головка бедренной кости по RTOG	$V_{30\text{Гр}} \leq 15\%$	36,8 Гр	33,4 Гр	31,4 Гр
Левая головка бедренной кости по QUANTEC	$V_{50\text{Гр}} \leq 5\%$	49,0 Гр	38,0 Гр	32,0 Гр
Правая головка бедренной кости по RTOG	$V_{30\text{Гр}} \leq 15\%$	41,2 Гр	32,0 Гр	35,0 Гр
Правая головка бедренной кости по QUANTEC	$V_{50\text{Гр}} \leq 5\%$	49,0 Гр	38,0 Гр	35,0 Гр
Спинной мозг по RTOG	$D_{max48}$	49,3 Гр	34,0 Гр	33,4 Гр
Спинной мозг по QUANTEC	$D_{max50}$	49,3 Гр	34,0 Гр	33,4 Гр

\*Примечание: в таблице приведены абсолютные дозовые значения (Гр); ограничения RTOG/QUANTEC даны в дозо-объемной форме ( $Vx$ ).

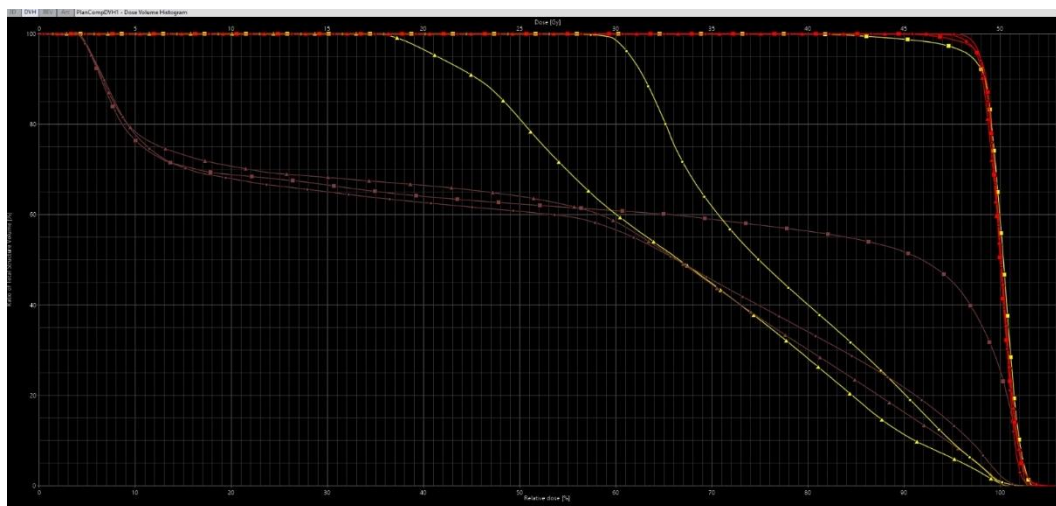


Рисунок 3. Усреднённые дозово-объёмные гистограммы для PTV, прямой кишки и мочевого пузыря при 3D-CRT, IMRT и VMAT

Полученные количественные результаты, представленные в таблице 2, наглядно иллюстрируются усреднёнными дозово-объёмными гистограммами, отражающими распределение дозы в мишени и основных органах риска при использовании различных методик планирования лучевой терапии на рисунке 3.

На данном графике (рисунок 3) представлены усреднённые дозово-объёмные гистограммы, демонстрирующие распределение дозы (ось X) в зависимости от облучаемого объёма структур (ось Y) для трёх сравниваемых методик: 3D-CRT (квадратные линии), IMRT (круглые линии) и VMAT (треугольные линии). Кривые PTV (верхние, красные) показывают, что все методики обеспечивают высокий уровень покрытия мишени, однако для IMRT и особенно VMAT они располагаются более вертикально, что указывает на более равномерное распределение дозы и лучшую гомогенность внутри целевого объёма. В противоположность этому кривые органов риска (прямая кишка и мочевой пузырь) демонстрируют выраженные различия между методиками. Для 3D-CRT соответствующие кривые расположены правее и выше, что отражает облучение большего объёма органов высокими дозами. При использовании IMRT и VMAT кривые смещаются влево и вниз, что свидетельствует о снижении дозовой нагрузки на критические структуры. Наиболее выраженное уменьшение объёма тканей, получающих высокие дозы ( $\geq 35$  Гр), наблюдается при VMAT, что подтверждает её преимущество в снижении дозовой нагрузки на органы риска [14].

#### ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные дозиметрические результаты согласуются с данными международных исследований и подтверждают, что 3D-CRT имеет ограниченные возможности по формированию высококонформных дозовых распределений в условиях сложной анатомии малого таза. Эти ограничения проявляются в менее выраженной защите органов риска по сравнению с

IMRT и VMAT. Результаты исследования демонстрируют, что в данной выборке VMAT обеспечивает более высокие показатели конформности и гомогенности по сравнению с IMRT и 3D-CRT. Эти данные согласуются с рядом международных публикаций, указывающих на преимущества методов модуляции интенсивности при лучевой терапии опухолей малого таза [15].

Полученные статистически подтверждённые различия ( $p < 0,05$ ) отражают закономерное преимущество методов модуляции интенсивности в формировании более конформного дозового распределения и в снижении лучевой нагрузки на критические структуры малого таза. В представленной выборке наиболее благоприятное сочетание конформности дозового распределения и снижения лучевой нагрузки на органы риска демонстрирует технология VMAT. Данное преимущество обусловлено способностью метода формировать крутой дозовый градиент за счёт алгоритмов обратного планирования, обеспечивающих синхронизированное движение гентри и многолепесткового коллиматора. Вместе с тем методики модуляции интенсивности характеризуются повышенной чувствительностью к позиционным смещениям: высокая конформность дозового распределения, являясь их преимуществом, одновременно повышает риск географических ошибок. В связи с этим обязательным элементом клинического применения данных технологий является использование IGRT/СВСТ перед каждым сеансом, что позволяет своевременно выявлять и корректировать смещения, обусловленные изменениями наполнения органов малого таза и внутрифракционной подвижностью. Клиническое значение ежедневной IGRT-верификации существенно, поскольку позволяет уменьшить внутрифракционные смещения и повысить точность доставки дозы. Снижение средних доз на прямую кишку и мочевой пузырь, а также существенное уменьшение объемов тонкого кишечника,

получающих высокие дозы, напрямую ведет к минимизации острой и, что более важно, поздней лучевой токсичности. В частности, снижение дозы на прямую кишку уменьшает вероятность развития проктита III–IV степени, а минимизация облучения тонкого кишечника критично для поддержания нутритивного статуса пациенток в период химиолучевой терапии. Улучшение переносимости лечения позволяет радиотерапевтам более уверенно назначать полную предписанную дозу и сопутствующую химиотерапию, что в итоге повышает общую выживаемость и улучшает качество жизни, соответствуя современным онкологическим стандартам.

Следует особо отметить, что применение этих современных методик в Казахстане, в частности на базе Центра ядерной медицины и онкологии области Абай, стало возможным благодаря активному внедрению достижений технологического прогресса в клиническую практику. Дополнительным подтверждением высокой точности и надёжности планирования является участие Центра в международных программах Технического сотрудничества МАГАТЭ (KAZ6013 «Improving clinical practice at the center of nuclear medicine and oncology of the East region», KAZ6011 «Supporting the establishment of high-tech nuclear medicine departments in radiotherapy centres»), направленных на укрепление кадрового потенциала, развитие планирования и внедрение международных стандартов в лучевой терапии. Полученные результаты исследования свидетельствуют о технической возможности и клинической обоснованности применения высококонформных методов планирования на современном линейном ускорителе в условиях регионального онкологического центра, что способствует повышению качества лучевой терапии и расширению возможностей персонализированного подхода в лечении онкологических заболеваний.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный сравнительный анализ дозиметрических планов на репрезентативной выборке пациенток с местно-распространенным раком шейки матки продемонстрировал, что методики лучевой терапии с модуляцией интенсивности – IMRT и, в особенности, VMAT – обеспечивают более благоприятные характеристики дозового распределения по сравнению с традиционной 3D-CRT по всем ключевым параметрам. Полученные результаты свидетельствуют о более высокой дозиметрической эффективности технологии VMAT, обеспечивающей оптимальное распределение дозы в целевом объёме при одновременном улучшении защиты органов риска при лучевой терапии опухолей малого таза. Данные выводы не ограничиваются чисто техническим превосходством: высокое значение конформности и гомогенности, достигнутое при VMAT, является важным условием для повышения вероятности локального контроля при одновременной минимизации лучевой нагрузки на здоровые ткани.

Главный клинический вывод заключается в значительном снижении дозовой нагрузки на органы риска, особенно прямой кишки и тонкого кишечника. Снижение средних доз и объема облучаемых высокодозовых зон на 25–30% относительно 3D-CRT, обеспечивает необходимый запас прочности, который трансформируется в осязаемое снижение частоты и тяжести осложнений III–IV степени. Это позволяет пациентам лучше переносить сопутствующую химиотерапию, завершать полный курс лучевой терапии без незапланированных перерывов и, в конечном итоге, способствует улучшению их выживаемости и качества жизни после лечения. Сокращение времени сеанса облучения до 5–7 минут (таблица 1) служит дополнительным преимуществом VMAT, поскольку уменьшает вероятность внутрифракционных смещений – фактора, имеющего критическое значение в условиях подвижной анатомии малого таза. Минимизация смещений повышает фактическую точность доставки дозы и снижает риск географических погрешностей.

Внедрение и успешное применение VMAT в условиях Центра ядерной медицины и онкологии области Абай свидетельствует о достижении высокого уровня технологической и методологической готовности регионального онкологического центра. Реализация высокоточного радиотерапевтического плана требует тесного междисциплинарного взаимодействия между радиотерапевтами и медицинскими физиками, включая точное контурирование мишени, оптимизацию дозового распределения и обязательное использование систем ежедневной верификации положения пациента (IGRT/CBCT). Существенную роль в освоении современных технологий лучевой терапии сыграли программы международного сотрудничества, включая проекты Технического сотрудничества МАГАТЭ и Форума по ядерной кооперации в Азии (FNCA), которые обеспечили подготовку специалистов и внедрение передовых методик планирования и верификации лечения. Таким образом, развитие современных технологий лучевой терапии в Казахстане обеспечивается не только модернизацией оборудования, но и укреплением профессионального потенциала, что гарантирует поддержание качества радиационной онкологии на уровне международных стандартов.

#### ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Sung H., Ferlay J., Siegel R.L., Laversanne M., Soerjomataram I., Jemal A., Bray F. Global Cancer Statistics 2020: GLOBOCAN Estimates of Incidence and Mortality Worldwide for 36 Cancers in 185 Countries // *CA Cancer Journal for Clinicians*. – 2021. – Vol. 71, No. 3. – P. 209–249. – <https://doi.org/10.3322/caac.21660>
2. Yao G., Qiu J., Zhu F., Wang X. Survival of Patients with Cervical Cancer Treated with Definitive Radiotherapy or Concurrent Chemoradiotherapy According to Histological Subtype: A Systematic Review and Meta-Analysis //

- Frontiers in Medicine (Lausanne). – 2022. – Vol. 9. – Art. 843262. – <https://doi.org/10.3389/fmed.2022.843262>
3. Pritanjali S., Rajhans K., Amrita R. Dosimetric Comparison of 3-Dimensional Conformal Radiotherapy (3DCRT), Intensity Modulated Radiotherapy (IMRT) and Volumetric-Arc Radiotherapy (VMAT) in Cervical Cancer Treatment // *Annals of Radiation Therapy and Oncology*. – 2023. – Vol. 4, Issue 1. – Art. 1022.
  4. Dröge L.H., von Sivers F.F., Schirmer M.A., Wolff H.A. Conventional 3D conformal radiotherapy and volumetric modulated arc therapy for cervical cancer: Comparison of clinical results with special consideration of the influence of patient- and treatment-related parameters // *Strahlentherapie und Onkologie*. – 2021. – Vol. 197, No. 6. – P. 520–527. – <https://doi.org/10.1007/s00066-021-01782-5>
  5. Shen Y., Tang X., Lin S., Jin X., Ding J., Shao M. Automatic dose prediction using deep learning and plan optimization with finite-element control for intensity modulated radiation therapy // *Medical Physics*. – 2024. – Vol. 51, No. 1. – P. 545–555. – <https://doi.org/10.1002/mp.16743>
  6. Gazsi I., Marcu L.G. Comparative dosimetric assessment of combined treatment modalities in cervical cancer radiotherapy for optimal organ protection // *Radiation and Environmental Biophysics*. – 2025. – Vol. 64, No. 2. – P. 291–302. – <https://doi.org/10.1007/s00411-025-01113-7>
  7. Dose management systems – from setting up to quality assurance // *IAEA Human Health Series*. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2025. – No. 49.
  8. Marks L.B., Ten Haken R.K., Martel M.K. Guest editor's introduction to QUANTEC: a user's guide // *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. – 2010. – Vol. 76, No. 3 (Suppl.). – P. 1–2. – <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2009.08.075>
  9. Требования к точности и факторы неопределенности в лучевой терапии / МАГАТЭ. – Вена: МАГАТЭ, 2025. – (Серия изданий МАГАТЭ по здоровью человека; № 31). [Accuracy Requirements and Uncertainties in Radiotherapy // *IAEA Human Health Series*. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2025. – No. 31.]
  10. Mayadev J.S., Albuquerque K.V., Price J.G., Marcrom S., Hrycushko B.A., Horwitz E.M., Panetta J., Stanley D.N., Samanta S., Sabouri P., Liu P.Y., Kohlmyer S., McCann C., Russell K., Moore K.L., Ray X. ARTIA-Cervix: a prospective trial of adaptive radiation therapy for cervical cancer // *International Journal of Gynecological Cancer*. – 2025. – Vol. 21. – Art. 102823. – <https://doi.org/10.1016/j.ijgc.2025.102823>
  11. Clark R., Magliari A., Rosa L., Li T., Beriwal S., Cozzi L. Comparison of Advanced Dynamic Arc Therapy with Collimator Rotation and Fixed Integrated Gantry Positions to the Standard of Care Across Five Treatment Sites // *Cureus*. – 2025. – Vol. 1817, No. 6. – Art. e86280. – <https://doi.org/10.7759/cureus.86280>
  12. Liu Y., Huang L., Leng Z., Chen M., Zhang J., Chen R., Chen Z., Liu Y., Qi Z., Zhou Q., Deng X., Peng Y. Fully automated intensity-modulated radiotherapy plans for rectal cancer based on deep learning predictions of three-dimensional dose distributions // *Quantitative Imaging in Medicine and Surgery*. – 2025. – Vol. 15, No. 12. – P. 12482–12496. – <https://doi.org/10.21037/qims-2025-168>
  13. Downes M.H., Olsen V., Williams A., Sheu R., Thor M., Greenwald L., Dumane V., Hsieh K., Ali A., Morgan O., Buckstein M., Marshall D.C. A feasibility study of sexual organ-dose sparing volumetric modulated arc therapy in female low rectal cancer patients treated with three-dimensional conformal radiation therapy // *Journal of Applied Clinical Medical Physics*. – 2025. – No. 12. – Art. e70394. – <https://doi.org/10.1002/acm2.70394>
  14. Small W. Jr., Bosch W.R., Harkenrider M.M., Strauss J.B. [et al.] NRG Oncology/RTOG Consensus Guidelines for Delineation of Clinical Target Volume for Intensity Modulated Pelvic Radiation Therapy in Postoperative Treatment of Endometrial and Cervical Cancer: An Update // *International Journal of Radiation Oncology, Biology, Physics*. – 2021. – Vol. 109, No. 2. – P. 413–424. – <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2020.08.061>
  15. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии / МАГАТЭ. – Вена: МАГАТЭ, 2025. – (Серия технических докладов; № 398 (Rev. 1)). [Determination of Absorbed Dose in External Beam Radiotherapy // *IAEA Technical Reports Series*. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2025. – No. 398 (Rev. 1)]

QUANTEC ЖӘНЕ RTOG ХАТТАМАЛАРЫНА СӘЙКЕС 3D-CRT, IMRT ЖӘНЕ VMAT ӘДІСТЕРІН  
ҚОЛДАНУ КЕЗІНДЕГІ ДОЗАЛЫҚ ТАРАЛУЛАР МЕН МҮШЕЛІК ДОЗАЛАРДЫҢ САЛЫСТЫР-  
МАЛЫ ТАЛДАУЫ: ЖОСПАРЛАУ ЕРЕКШЕЛІКТЕРІ, АРТЫҚШЫЛЫҚТАРЫ МЕН ШЕКТЕУЛЕРІ

А. Д. Мергенбаева, С. З. Танатаров, М. Т. Идинов, Л. Б. Кенжина\*, Б. Ж. Атантаева,  
С. М. Айткалиев, А. Д. Алибекова, А. Д. Тусупова, Н. А. Елемесова, Е. О. Сабеков

*Абай облысы ДСБ «Ядролық медицина және онкология орталығы» КМК, Семей, Қазақстан*

\* Байланыс үшін E-mail: laurakenzhina@yandex.kz

Зерттеу Семей қаласындағы Ядролық медицина және онкология орталығының базасында жүргізілді және жергілікті-кең таралған жатыр мойны обыры кезінде қашықтықтан сәулелік терапияны жоспарлау параметрлерінің салыстырмалы дозиметриялық талдауына арналған. Үш өлшемді конформды сәулелік терапия (3D-CRT), қарқындылығы модуляцияланған сәулелік терапия (IMRT) және көлемдік модуляцияланған доғалық терапия (VMAT) әдістері дозалық таралулардың сапасы мен қауіп-қатерлі мүшелерге түсетін дозалық жүктеме тұрғысынан салыстырылды. Жоспарлау күнделікті IGRT/CBCT негізіндегі пациентті орналастыруды верификациялау арқылы TrueBeam сызықтық үдеткішін қолдана отырып, 25 пациентке жүргізілді. Жоспарлардың сапасы дозалық-көлемдік гистограммалар негізінде PTV үшін D95%, конформдылық индексі (CI) және гомогендік индексі (HI), сондай-ақ қауіп-қатерлі мүшелер үшін абсолютті дозалық параметрлер (Dmean, Dmax) арқылы RTOG және QUANTEC хаттамаларының ұсыныстарымен салыстыра отырып бағаланды. Талдау нәтижелері VMAT әдісінің ең үздік дозиметриялық көрсеткіштерге ие екенін көрсетті: конформдылық индексі  $CI = 1,03 \pm 0,02$  және гомогендік индексі  $HI = 0,09 \pm 0,02$ , бұл IMRT және 3D-CRT әдістерімен салыстырғанда PTV-ны біркелкі әрі дәл қамтуды қамтамасыз етеді. Негізгі нәтижелердің бірі – жамбас аймағындағы қауіп-қатерлі мүшелерге түсетін дозалық жүктеменің айтарлықтай төмендеуі: VMAT қолданылғанда жиынтық доза 3D-CRT әдісімен салыстырғанда орта есеппен 25–30% азайды, ал тік ішекке түсетін орташа доза (Dmean) 33,0 Гр дейін төмендеді. Сонымен қатар, VMAT әдісі сәулелендіру сеансының орташа уақытын 5–7 минутқа дейін қысқартып, ішкі фракциялық ығысулар қауіпін азайтты. Алынған нәтижелер VMAT әдісінің дозиметриялық артықшылықтарын растайды және оны өңірлік онкологиялық орталық жағдайында қолданудың орындылығын негіздейді.

**Түйін сөздер:** жатыр мойны обыры, қашықтықтан сәулелік терапия, дозалық жоспарлау, 3D-CRT, IMRT, VMAT, дозалық таралу, қауіп-қатерлі мүшелер, конформдылық индексі, QUANTEC, RTOG.

COMPARATIVE ANALYSIS OF DOSE DISTRIBUTIONS AND ORGAN DOSES  
IN 3D-CRT, IMRT AND VMAT ACCORDING TO QUANTEC AND RTOG PROTOCOLS:  
PLANNING FEATURES, ADVANTAGES AND LIMITATIONS

A. D. Mergenbayeva, S. Z. Tanatarov, M. T. Idinov, L. B. Kenzhina\*, B. Zh. Atantayeva,  
S. M. Aitkaliyev, A. D. Alibekova, A. D. Tussupova, N. A. Elemessova, E. O. Sabekov

*“Center of Nuclear Medicine and Oncology” of Abay Regional Health Department, Semey, Kazakhstan*

\* E-mail for contacts: laurakenzhina@yandex.kz

The study was conducted at the Center of Nuclear Medicine and Oncology (Semey) and is devoted to a comparative dosimetric analysis of external beam radiotherapy planning parameters for locally advanced cervical cancer. Three-dimensional conformal radiotherapy (3D-CRT), intensity-modulated radiation therapy (IMRT), and volumetric modulated arc therapy (VMAT) were compared in terms of dose distribution quality and dose burden to organs at risk. Treatment planning was performed for 25 patients using a TrueBeam linear accelerator with daily patient setup verification based on IGRT/CBCT. Plan quality was evaluated using dose–volume histograms, including D95% for the planning target volume (PTV), conformity index (CI) and homogeneity index (HI), as well as absolute dose parameters (Dmean, Dmax) for organs at risk, in accordance with RTOG criteria and QUANTEC recommendations. The analysis demonstrated that VMAT provided the most favorable dosimetric performance, with a high conformity index ( $CI = 1,03 \pm 0,02$ ) and a low homogeneity index ( $HI = 0,09 \pm 0,02$ ), ensuring more uniform and accurate PTV coverage compared with IMRT and 3D-CRT. A key finding was a substantial reduction in dose burden to pelvic organs at risk: VMAT resulted in an average 25–30% reduction in overall dose compared with 3D-CRT, while the mean dose to the rectum (Dmean) decreased to 33,0 Gy. In addition, VMAT significantly reduced the average treatment delivery time to 5–7 minutes, thereby lowering the risk of intrafraction motion. The obtained results confirm the dosimetric advantages of VMAT and substantiate its feasibility for routine clinical use in a regional oncology center.

**Keywords:** cervical cancer, external beam radiotherapy, dose planning, 3D-CRT, IMRT, VMAT, dose distribution, organs at risk, conformity index, QUANTEC, RTOG.