

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2026-1-160-168>

УДК 615.849:616-006.6:616-073.75

ФИЗИКО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ 2D И 3D ПЛАНИРОВАНИЯ В КЛИНИЧЕСКОЙ БРАХИТЕРАПИИ: ОПЫТ ЦЕНТРА ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ И ОНКОЛОГИИ (Г. СЕМЕЙ)

А. Д. Тусупова^{1,2}, С. М. Айткалиев¹, Ж. Қ. Айткалиев¹, М. Т. Идинов^{1,2}, С. З. Танатаров¹,
Л. Б. Кенжина^{1,2}, О. А. Степанова², Н. А. Елемесова¹, А. Д. Мергенбаева¹, А. К. Есенгари¹

¹ КГП «Центр ядерной медицины и онкологии» УЗ области Абай, Семей, Казахстан

² НАО «Шәкәрім университет», Семей, Казахстан

* E-mail для контактов: laurakenzhina@yandex.kz

В статье представлен ретроспективный физико-дозиметрический анализ различий между двумерным (2D) и трёхмерным (3D) планированием высокодозной брахитерапии у 20 пациенток с местно-распространённым раком шейки матки. Исследование проведено на базе Центра ядерной медицины и онкологии (ЦЯМиО) области Абай в 2023–2025 гг. и включало две независимые когорты по 10 планов каждая, выполненных с использованием системы GammaMed Plus iX с источником иридий-192 и программного комплекса BrachyVision. Ключевой особенностью методологии явилось применение специализированного стола-провайдера для компьютерно-томографической топографии, обеспечивающего технологию индексированного позиционирования и исключающего геометрические погрешности при подготовке к 3D-планированию. Целью исследования была количественная оценка различий дозового охвата клинического целевого объёма и дозовых нагрузок на органы риска при переходе к 3D-планированию. Для обеспечения методологической сопоставимости, в соответствии с рекомендациями GEC-ESTRO и ICRU Report 89, для 10 планов 2D-группы выполнено ретроспективное контурирование HR-CTV и OAR на архивных КТ-изображениях, с последующим перерасчётом объёмных дозиметрических параметров. Основными критериями анализа были HR-CTV D90 и OAR D2cc (для мочевого пузыря, прямой и сигмовидной кишки). Статистический анализ независимых выборок показал, что 3D-планирование, подкреплённое прецизионной фиксацией мишени, ассоциируется со снижением вариабельности HR-CTV D90, повышением конформности дозового распределения и возможностью корректной оценки объёмных дозовых нагрузок на органы риска. Полученные результаты соответствуют международным рекомендациям и подчёркивают преимущества трёхмерного планирования, направленные на повышение точности, качества и безопасности брахитерапии в онкологической практике Казахстана.

Ключевые слова: медицинская физика, рак шейки матки, брахитерапия, иридий-192, 3D-планирование, 2D-планирование, высокорисковый клинический целевой объём, органы риска.

ВВЕДЕНИЕ

Рак шейки матки является одним из распространённых злокачественных новообразований в гинекологии и остаётся одной из наиболее значимых причин смертности среди женщин в мире. Согласно данным Всемирной организации здравоохранения, несмотря на усилия в скрининге и вакцинации, в 2022 году в мире диагностировано 660 000 новых случаев заболевания, около 350 000 из которых закончились летальным исходом [1, 2]. В Казахстане рак шейки матки по оценкам Международного агентства по исследованию рака (IARC) на момент 2023 года ежегодно диагностировался у 1777 женщин, и 834 женщины умерли от этого заболевания. Рак шейки матки занимает второе место по частоте встречаемости среди женщин в Казахстане и второе место по частоте встречаемости среди женщин в возрасте от 15 до 44 лет [3, 4].

Европейское общество радиотерапии и онкологии (ESTRO, GEC-ESTRO) Американское общество брахитерапии (ABS) и Европейская группа брахитерапии (Кюритерапии) (GEC) рекомендуют брахитерапию как неотъемлемую часть стандартного лечения пациентов, получающих первичную лучевую терапию с диагнозом рака шейки матки [5]. Основным

преимуществом брахитерапии является крутой градиент дозы вокруг радиоактивного источника, это гарантирует, что опухолевая клетка получит более высокую дозу облучения, а окружающие органы риска (OOR) будут максимально защищены [6]. В настоящее время в клинической практике используются два основных типа технологий брахитерапии – двумерная и трёхмерная. Двумерная традиционная брахитерапия (2D-БТ) использует ортогональные двухмерные рентгеновские изображения для назначения дозы в конкретной четко определенной точке (например, точке А) и получения грушевидного распределения изодозы как это было определено в Отчете ICRU № 38 2D-БТ широко используется благодаря своей простоте и практичности, особенно в развивающихся странах [7]. Однако 2D-планирование имеет существенные ограничения: оно не учитывает индивидуальную анатомию пациентки, не позволяет определить истинное трёхмерное распределение дозы, и существенно ограничено в оценке объёмных параметров – включая контурирование HR-CTV и расчёт дозовых нагрузок OAR D2cc, что снижает точность дозиметрического анализа [8].

Внедрение компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ) в клиническую практику привело к переходу на визуализированное трёхмерное (3D) планирование брахитерапии. Этот подход позволяет выполнять конформное облучение, когда доза адаптируется к фактической форме опухоли. Клиническое обоснование этого перехода было формализовано рабочими группами GEC-ESTRO [9, 10] и МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии) [11], которые однозначно рекомендовали использование 3D-изображений для контурирования целевых объемов и органов риска. Основным документом, регламентирующим этот подход, является Отчет ICRU № 89 (2013 год) который заменил устаревший ICRU № 38 и ввёл стандартизированные объёмные параметры как HR-CTV D₉₀ (доза, покрывающая 90% HR-CTV) и OAR D_{2cc} (доза на наиболее облучённые 2 см³ ООР) [12, 13]. Принятие этих критериев является глобальным стандартом и напрямую коррелирует с улучшением показателей локального контроля и снижением частоты поздних лучевых повреждений, что доказано в рамках исследований, таких как RetroEMBRACE (Ретроспективное европейское исследование брахитерапии рака шейки матки под контролем МРТ) и EMBRACE (Европейское исследование брахитерапии рака шейки матки под контролем МРТ) [14–17]. Несмотря на широкое внедрение 3D-подхода в международной практике, в Казахстане отсутствовали количественные данные, объективно сравнивающие дозиметрические преимущества 3D-планирования над традиционным 2D-методом. Для обоснования технологической модернизации и обеспечения высокого качества лучевой терапии критически необходима количественная оценка преимуществ 3D-планирования.

В этой связи целью настоящего исследования является количественная оценка различий дозового охвата клинического целевого объёма и дозовых нагрузок на органы риска при ретроспективном переходе от 2D- к 3D-планированию брахитерапии на основе КТ-визуализации. Проведенный на базе Центра ядерной медицины и онкологии области Абай сравнительный дозиметрический анализ позволяет не только подтвердить соответствие качества брахитерапии международным стандартам, но и предоставить первые региональные данные о преимуществах 3D-визуализированного планирования, что имеет стратегическое значение для дальнейшей оптимизации и стандартизации онкологической помощи в Республике Казахстан [18].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Материалом послужили 20 планов брахитерапии высокодозным источником (HDR) у пациенток с местно-распространенным раком шейки матки, проходивших курс сочетанной лучевой терапии в Центре ядерной медицины и онкологии области Абай с 2023 по 2025 год. Выборка была разделена на две независимые группы по 10 клинических случаев в каждой: планы лечения, выполненные по классической 2D

методике, и планы лечения, выполненные по современной 3D методике.

Оборудование и дозиметрическое обеспечение было представлено автоматизированной высокодозной системой GammaMed Plus iX (Varian Medical Systems Inc., США) с источником Иридий-192 (¹⁹²Ir) и расчётом дозы по протоколу AAPM TG-43, с периодом полураспада $T_{1/2} = 74$ суток, средняя энергия гамма-излучения $E_{\gamma} = 0,38$ МэВ.

Перед началом анализа было проведено всестороннее тестирование высокодозного аппарата GammaMed Plus iX. Были выполнены дозиметрические измерения для валидации правильности подводимой дозы. Доза в контрольных точках А (правая и левая) измерялась с помощью ионизационной камеры (точечный метод). Полученные результаты подтвердили высокую точность системы: отклонение фактической дозы от расчетной составило $-1,2\%$ для точки А (R) и $+1,8\%$ для точки А (L), что соответствует допустимым международным значениям (допуск $<5-7\%$ по TG-43U1). Кроме того, был измерен критический параметр – смещение аппликатора (Applicator offset). Аппликаторы – это специальные медицинские устройства, которые вводятся в полость матки и влагалище и служат для точного позиционирования радиоактивного источника ¹⁹²Ir в непосредственной близости от опухоли. Точность данного параметра критична, так как погрешность приводит к систематической дозовой ошибке. Для оценки смещения аппликаторов использовалась радиохромная пленка (см. рисунок 1), что позволило визуально оценить точность позиционирования источника. Результаты измерения смещения аппликатора показали высокую точность позиционирования: расчетное показание линейки составило 6 ± 1 мм при теоретическом значении 6 мм, с погрешностью менее 1 мм (таблица 1).

Таблица 1. Измерение и оценка смещения аппликатора

Параметры	Полученные значения
Измерение (расчетное показание линейки)	6 ± 1 мм
Расчетная оценка	6 мм
Погрешность	<1 мм

Визуализация для 3D-планирования осуществлялась методом КТ-топометрии на многосрезовом компьютерном томографе непосредственно после инсталляции аппликаторов. Критически важным преимуществом технического обеспечения данного исследования, выделяющим базу ЦЯМиО области Абай на национальном уровне, является использование специализированного стола-провайдера (SIHO, Spain). На момент проведения анализа данное оборудование, интегрированное в единый технологический цикл с системой GammaMed Plus iX, представлено в Республике Казахстан в единственном экземпляре, что позволяет рассматривать ЦЯМиО

области Абай как референсный центр по внедрению высокоточных технологий брахитерапии.

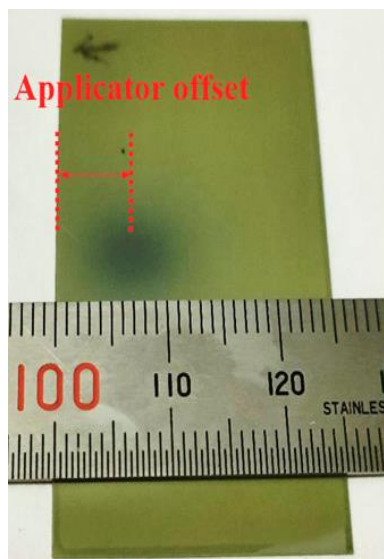


Рисунок 1. Контроль качества аппарата GammaMed Plus iX: измерение смещения источника (аппликатора) с использованием радиохромной пленки

Применение стола-провайдера позволяет реализовать технологию индексированного позиционирования, что полностью решает проблему технологического несоответствия между этапами визуализации и лечения, характерную для стандартных КТ-кушеток. Данный подход исключает необходимость физического перекалывания пациентки, тем самым нейтрализуя риск смещения аппликаторов и деформации мягких тканей, вызванных активными движениями пациента или изменением геометрии опоры. Это гарантирует стабильное и воспроизводимое положение аппликаторов относительно органов малого таза в процессе получения КТ-изображений, которые в дальнейшем используются для 3D-планирования в программном комплексе BrachyVision. Точность взаимного расположения мишени (HR-CTV), аппликаторов и органов риска напрямую влияет на корректность расчёта объёмных дозиметрических параметров, включая HR-CTV D_{90} и OAR D_{2cc} . Кроме того, использование стола-провайдера обеспечивает жесткую синхронизацию геометрии КТ-исследования с координатной системой планирующего программного обеспечения, что повышает точность реконструкции аппликаторов и расчёта путей движения источника ^{192}Ir . Это способствует улучшению конформности дозового распределения и снижению неопределённостей при оптимизации плана лечения. Следовательно, применение стола-провайдера выступает неотъемлемым элементом обеспечения качества (Quality Assurance) 3D-брахитерапии, гарантирующим соответствие международным рекомендациям [12], а также повышая общую надёжность и безопасность дозиметрического планирования.



Рисунок 2. Специализированный стол-провайдер (SIHO) для КТ-визуализации при брахитерапии в ЦЯМуО области Абай

Дозиметрическое моделирование и расчеты осуществлялись в программном комплексе BrachyVision (Varian Medical Systems Inc., США), предназначенном для трёхмерного дозового моделирования. Все объёмы контурировались на КТ-изображениях в соответствии с международными рекомендациями ICRU Report 89 и GEC-ESTRO.

Высокорисковый клинический целевой объём (HR-CTV) определялся как остаточная опухоль и зоны вероятного микроскопического распространения в шейке матки и параметрии на момент брахитерапии. Органами риска (OOP) являлись мочевого пузыря, прямая кишка, сигмовидная кишка. Главными параметрами для сравнительного дозиметрического анализа служили: HR-CTV D_{90} (минимальная доза, получаемая 90% объёма высокорискового клинического целевого объёма) и OAR D_{2cc} (доза, приходящаяся на наиболее облучённые 2 cm^3 органа риска. В 2D-планах объёмные параметры не могут быть рассчитаны напрямую; поэтому их определение выполнялось ретроспективно на основе реконструкции дозовых распределений на КТ-срезах. Методология представляла собой ретроспективный сравнительный дозиметрический анализ. Основной задачей методологии было обеспечение научно обоснованной сопоставимости объёмных дозиметрических показателей между группами, которые изначально использовали принципиально разные подходы к планированию (точечный 2D и объёмный 3D). С этой целью, для 10 планов 2D-группы было проведено ретроспективное контурирование HR-CTV и OOP на архивных КТ-изображениях, что соответствует рекомендованному GEC-ESTRO подходу ретроспективной объёмной реконструкции при сравнительном анализе методик планирования. После контурирования были пересчитаны объёмные дозиметрические показатели (HR-CTV D_{90} и OAR D_{2cc}) с использованием оригинальных параметров 2D-плана.

Подобная методология позволила сравнить объективные объёмные параметры, полученные двумя разными методами планирования, но сопоставлен-

ные в рамках единой дозиметрической платформы. Сравнение средних значений дозиметрических параметров между двумя независимыми когортами проводилось с использованием критерия Стьюдента для независимых выборок (или критерия Манна–Уитни при отсутствии нормального распределения). Для параметров, подчиняющихся протокольной дозе (например, HR-CTV D90), статистическая значимость ожидаемо отсутствует. Различия считались статистически значимыми при $P \leq 0,05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведенный ретроспективный дозиметрический анализ 20 планов брахитерапии выявил существенные методологические различия между двумерным (2D) и трехмерным (3D) планированием, которые напрямую влияют на качество распределения дозы и возможность объективной оценки органов риска. Для наглядной демонстрации подходов к планированию, а также для иллюстрации методов, описанных ранее, один клинический случай был использован как репрезентативный пример, отражающий типичную конфигурацию аппликаторов и характер дозовых распределений. Традиционное 2D-планирование базируется на геометрических точках (Точка А, R и L), определенных на ортогональных рентгенографических снимках.

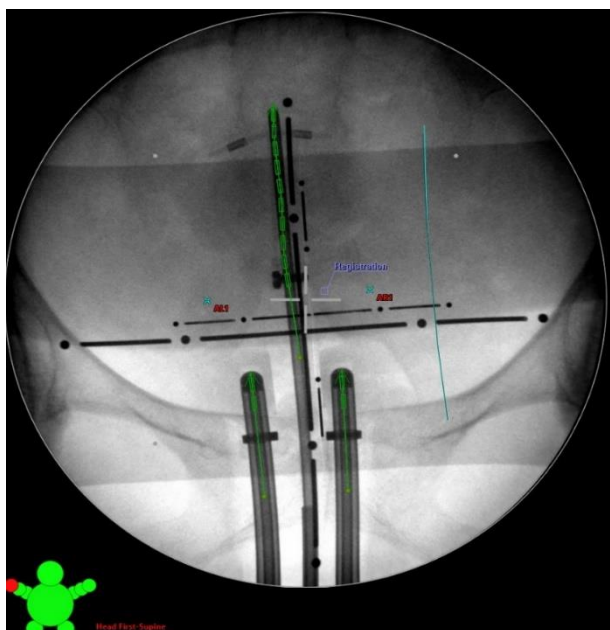


Рисунок 3. Двумерное (2D) планирование брахитерапии: рентгенографический снимок, демонстрирующий позиционирование аппликаторов и определение контрольных точек (Точка А)

На рисунке 3 представлена рентгенограмма, демонстрирующая классическую технику позиционирования аппликаторов и расчет дозы в Точка А (AL/AR). Средняя доза в точках нормализации составляла 6,8–7,1 Гр. Однако при таком подходе достоверная локализация высокорискового клиническо-

го целевого объема (HR-CTV) и органов риска затруднена, поскольку 2D-метод основан на плоских рентгенографических изображениях, не отражающих объемную анатомию и пространственные взаимоотношения между опухолью, аппликаторами и ООР. В результате дозовое распределение рассчитывается на основе геометрических допущений, что может приводить к гетерогенному распределению дозы в пределах опухолевого объема либо локальному превышению дозы на не визуализируемых критических структурах, не учитываемых в определении Точки А. Это является фундаментальным ограничением 2D-планирования, поскольку метод не предусматривает учёта индивидуальной анатомической вариабельности пациентки.

Использование 3D-визуализации (КТ) позволяет преодолеть ограничения 2D-подхода. Переход к 3D-планированию, который был применен к 10 планам для ретроспективной дозиметрической оценки, кардинально изменил подход, сделав его анатомически точным и адаптируемым. На рисунке 4 представлен аксиальный срез КТ клинического случая, где четко видно точное контурирование целевых объемов и органов риска (мочевой пузырь, прямая кишка). Высокая воспроизводимость анатомо-топографических соотношений на КТ-срезах и отсутствие артефактов смещения аппликаторов были достигнуты благодаря использованию стола-провайдера, что обеспечило прецизионную точность последующего оконтуривания. Именно этот визуализированный подход, основанный на рекомендациях GEC-ESTRO, позволил провести количественную дозиметрическую оптимизацию и последующий сравнительный анализ.

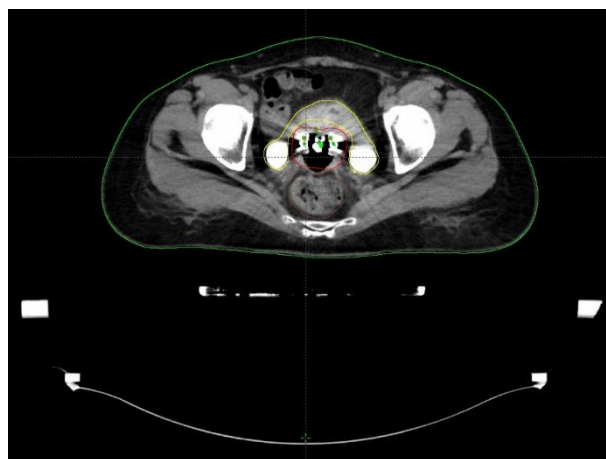


Рисунок 4. Трёхмерное (3D) планирование высокодозной брахитерапии: аксиальный срез КТ с контурированными объёмами и изодозовыми линиями

Использование 3D-визуализации позволило преодолеть указанные ограничения. На аксиальном срезе (рисунок 4) отчётливо прослеживается полноценное контурирование HR-CTV и OAR, что обеспечивает корректное пространственное моделирование дозового распределения в соответствии с рекоменда-

**ФИЗИКО-ДОЗИМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ 2D И 3D ПЛАНИРОВАНИЯ В КЛИНИЧЕСКОЙ БРАХИТЕРАПИИ:
ОПЫТ ЦЕНТРА ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЫ И ОНКОЛОГИИ (Г. СЕМЕЙ)**

циями GEC-ESTRO. В оптимизированных 3D-планах HR-CTV D90 составило $7,1 \pm 0,3$ Гр, что соответствует предписанной фракционной дозе и демонстрирует высокую степень конформности и воспроизводимости. Стабильность пространственного расположения критических структур относительно аппликаторной системы, гарантированная применением

технологии индексированного позиционирования на столе-провайдере, позволила минимизировать вариабельность дозовых нагрузок на органы риска. В ретроспективной реконструкции 2D-планов наблюдалась более высокая вариабельность дозового охвата HR-CTV (таблица 2), что отражает методологические ограничения геометрического подхода.

Таблица 2. Сравнение дозиметрических параметров при 2D и 3D планировании HDR-брахитерапии

Параметр	2D-планирование, Mean \pm SD	3D-планирование, Mean \pm SD	Сравнение	Комментарий / особенности метода
HR-CTV D90 (Гр)	7,0 \pm 0,4	7,1 \pm 0,3	$p \geq 0,05$	дозы соответствуют предписанной фракционной дозе (7 Гр) в обеих методиках
HR-CTV D100 (Гр) (если есть)	—	можно рассчитать	—	в 2D отсутствует как показатель; методологическое ограничение
OAR D2cc, мочевого пузыря (Гр)	оценка по референтной точке мочевого пузыря	4,3 \pm 0,4	—	в 2D отсутствует объёмная оценка, только точечная (ICRU Bladder Point)
OAR D2cc, прямая кишка (Гр)	оценка по референтной точке прямой кишки ICRU	3,0 \pm 0,5	—	в 2D дозы определяются по ICRU Rectal Point, D2cc недоступно
OAR D2cc, сигмовидная кишка (Гр)	не оценивается; ICRU-точки отсутствуют	3,3 \pm 0,5	—	в 2D сигмовидная кишка не оценивается
Однородность дозы (по DVH)	не выполняется	улучшенное распределение дозы	—	DVH-анализ доступен только в 3D
Пространственное распределение дозы	изодозы фиксированы, ориентир – точка A	полноценное 3D-распределение, учёт анатомии	—	ключевое отличие двух подходов
Возможность персонализации лечения	ограниченная	высокая	—	3D учитывает индивидуальную анатомию пациентки

Таблица демонстрирует ключевые методологические различия между 2D- и 3D-планированием. Несмотря на сопоставимые значения HR-CTV D90, соответствующие предписанной дозе 7 Гр, принципиальные различия между методами проявляются при оценке доз на критические органы. В 2D-подходе дозы на мочевой пузырь и прямую кишку определялись только по референтным точкам ICRU (ICRU Bladder Point и ICRU Rectal Point), а сигмовидная кишка не оценивалась в силу отсутствия соответствующих референтных точек в методологии ICRU 38. Следовательно, параметр OAR D2cc, являющийся международным стандартом объёмной дозиметрической отчётности (ICRU 89), в 2D-планах не может быть рассчитан принципиально. В 3D-планировании, напротив, стало возможным количественно определить значения D2cc для всех органов риска. Средние значения D2cc оказались ниже пороговых уровней, рекомендованных международными руководствами (в пересчёте на эквивалентную суммарную дозу EQD2 < 75 Гр для мочевого пузыря и прямой кишки), что свидетельствует о безопасном распределении дозы и высоком терапевтическом индексе. Возможность визуального определения наиболее облучаемых 2 см³ тканей позволила оптимизировать распо-

ложение и длину шагов источника ¹⁹²Ir, снижая нагрузку на OAR без ухудшения HR-CTV D90.

Таким образом, полученные результаты демонстрируют, что при равной протокольной дозе на мишень (7 Гр) 3D-планирование обеспечивает более безопасные объёмные дозиметрические параметры (минимальные значения OAR D2cc) и формирует анатомически обусловленное распределение дозы, что недостижимо в рамках традиционного двумерного подхода.

ОБСУЖДЕНИЕ

Проведённый ретроспективный дозиметрический анализ 20 планов брахитерапии выявил принципиальные методологические преимущества визуализированного 3D-планирования над традиционным 2D-подходом, подтверждая необходимость внедрения анатомически адаптированных методик. Наше исследование, ориентированное на количественную оценку ключевых дозиметрических индексов HR-CTV D90 и OAR D2cc, демонстрирует, что именно наличие объёмной визуализации является ключевым условием корректного расчёта дозиметрических параметров, тогда как двумерная методика принципиально не предусматривает вычисления объёмных показателей. Основным ограничением 2D-планирования является отсутствие учёта индивидуальной анатомии

ческой вариабельности, что приводит к выраженной вариабельности фактического дозового охвата опухоли. Несмотря на стандартную дозу в Точке А ($7,1 \pm 0,3$ Гр), ретроспективная реконструкция показала, что такие параметры, как HR-CTV D90, не могут быть определены с необходимой точностью из-за отсутствия объёмного контурирования и трёхмерного отображения органов риска. Это создаёт риск как недостаточного облучения отдельных участков опухоли, так и возможного превышения дозы на критические структуры, анатомически расположенные вне области, описываемой геометрией Точки А. Принципиальное отличие 3D-планирования заключается в возможности точного контурирования мишени и адаптации пространственного распределения дозы к её форме. Минимизация методологических неопределённостей в нашем исследовании была обеспечена не только программными средствами, но и жесткой фиксацией анатомических структур с помощью стола-провайдера, что позволило исключить систематические ошибки, связанные с деформацией тканей при подготовке к КТ. Благодаря этому в оптимизированных 3D-планах было отмечено уменьшение вариабельности дозового охвата и повышение конформности, что подтверждает анатомически обусловленное преимущество трёхмерного подхода.

Важным следствием внедрения 3D-методики является повышение безопасности терапии. В 2D-планировании дозовые нагрузки на органы риска могут быть оценены только косвенно – по референтным точкам ICRU, что не позволяет определить максимально облучаемые участки объёмом 2 см^3 и не обеспечивает полноценной оценки распределения дозы в ООР. Трёхмерная визуализация делает возможным корректное контурирование прямой кишки, мочевого пузыря и сигмовидной кишки, а также расчёт D2cc, что существенно повышает надёжность прогноза поздней токсичности. Полученные показатели OAR D2cc соответствуют клиническим рекомендациям международных проспективных исследований, включая EMBRACE, что подтверждает высокий терапевтический индекс 3D-брахитерапии. Анализ дозобъёмных гистограмм (DVH) продемонстрировал более однородное распределение дозы внутри HR-CTV и крутой градиент снижения дозы за его пределами, обеспечивая улучшенный охват мишени при одновременной защите органов риска.

Таким образом, результаты исследования полностью согласуются с глобальными рекомендациями GEC-ESTRO и Отчёта ICRU № 89, которые подчёркивают, что переход к визуализированному 3D-планированию является необходимым критерием качества и безопасности в современной брахитерапии. Данный подход обеспечивает оптимальный баланс между эффективностью (адекватное покрытие HR-CTV) и безопасностью (снижение дозовой нагрузки на ООР), что методологически недостижимо в рамках геометрического 2D-подхода. Следует отметить

и ограничения исследования: ретроспективный дизайн, отсутствие оценки локального контроля и поздней токсичности, небольшой размер выборки, а также методологическая несопоставимость 2D- и 3D-планирования, поскольку расчёт объёмных параметров в 2D-методе может быть выполнен лишь приближённо. Тем не менее полученные данные представляют собой убедительное основание для стандартизации 3D-визуализированной брахитерапии во всех онкологических центрах Республики Казахстан.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты настоящего сравнительного дозиметрического анализа имеют не только локальное клиническое, но и важное стратегическое значение для развития радиационной медицины и онкологии в Республике Казахстан. Внедрение трёхмерного визуализированного планирования брахитерапии, основанного на КТ и программном комплексе BrachyVision, подтвердило свое существенное методологическое преимущество над традиционным геометрически ориентированным двумерным подходом, где дозовое распределение формировалось на основе референтных геометрических точек, включая Точку А. С позиций медицинской физики и радиационной безопасности данное преимущество отражает результаты модернизации инфраструктуры и непрерывного повышения квалификации специалистов Центра ядерной медицины и онкологии, что стало возможным, в том числе, благодаря поддержке технических проектов МАГАТЭ. Оснащение Центра специализированной системой транспортировки и индексированного позиционирования пациенток (стол провайдер) позволило достичь эталонной геометрической точности, сделав ЦЯМиО области Абай первым учреждением Казахстана, внедрившим полные международные стандарты визуализированной 3D-брахитерапии.

Полученные данные демонстрируют, что достигнутый уровень дозиметрической точности соответствует международным критериям: переход к объёмно-ориентированному расчёту обеспечивает достоверное определение HR-CTV D90 и параметров OAR D2cc, минимизируя системные ошибки и повышая предсказуемость доставки предписанной дозы. Улучшение терапевтического индекса достигается за счёт оптимизации дозовой нагрузки на органы риска при сохранении высокого качества охвата целевого объёма. В ряде клинических случаев снижение дозы на ООР, например, для прямой кишки до $3,0 \pm 0,5$ Гр, отражает успешную реализацию принципа ALARA (As Low As Reasonably Achievable), что напрямую влияет на уменьшение вероятности поздней токсичности и способствует улучшению качества жизни пациенток [19]. Методология исследования и полученные результаты полностью соответствуют рекомендациям Международного агентства по атомной энергии по внедрению визуализированной брахитерапии (3D IGBT – Image-Guided Brachytherapy), что подтвер-

ждает статус Центра ядерной медицины и онкологии области Абай как учреждения, работающего по международным стандартам и выступающего региональным центром компетенций.

Локальный вклад данного исследования заключается не только в сравнении методик, но и в научно обоснованной демонстрации необходимости стандартизации визуализированной 3D-брахитерапии во всех регионах Казахстана. Повышение дозиметрической точности, достигнутое в Центре ядерной медицины и онкологии области Абай, является значимым вкладом в улучшение показателей заболеваемости, снижение инвалидизации и повышение продолжительности жизни женщин с раком шейки матки. Стратегически важно, чтобы 3D-визуализированная брахитерапия была стандартизирована на государственном уровне как обязательный элемент лечения, обеспечивающий равный доступ к высокотехнологичной онкологической помощи. Это позволит привести национальную клиническую практику в соответствие с результатами крупных международных исследований, включая программу EMBRACE, и укрепит позиции Казахстана как страны, интегрирующей современные технологии радиационной медицины для улучшения клинических исходов.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Global Cancer Observatory: Cancer Today // J. Ferlay, M. Ervik, F. Lam [et al.]. – Lyon, France – International Agency for Research on Cancer – 2024. – URL: <https://gco.iarc.who.int/today>
2. Bray F, Colombet M, Aitken JF, Bardot A, Eser S, Galceran J, Hagenimana M [et al.]. Cancer Incidence in Five Continents Volume XII // IARC Scientific Publication No. 169 – 2024. – Vol. 68, No. 6. – P. 394–424.
3. Kazakhstan: Human Papillomavirus and Related Cancers, Fact Sheet 2023 // ICO/IARC Information Centre on HPV and Cancer. – 2023. – URL: https://hpvcentre.net/statistics/reports/KAZ_FS.pdf
4. Здоровье населения Республики Казахстан и деятельность организация здравоохранения. Статистический сборник // Министерство здравоохранения РК. – Астана. – 2025. [Zdorov'e naseleniya Respubliki Kazakhstan i deyatel'nost' organizatsiya zdravookhraneniya. Statisticheskiy sbornik // Ministerstvo zdravookhraneniya RK. – Astana. – 2025.]
5. Holschneider, Christine H. [et al.] Brachytherapy: A critical component of primary radiation therapy for cervical cancer // Brachytherapy. – Vol. 18. – Iss. 2 – P. 123–132. – <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2018.11.009>
6. Keyes, Mira [et al.] Joint ABS/GEC-ESTRO Consensus Statement on the objectives of training in brachytherapy for physicians // Brachytherapy – 2025. – Vol. 24. – Iss. 5. – P. 631–643. – <https://doi.org/10.1016/j.brachy.2025.05.006>
7. Gupta A., Dey T., Rai B., Oinam A.S., Gy S., Ghoshal S. Point-Based Brachytherapy in Cervical Cancer with Limited Residual Disease: A Low- and Middle-Income Country Experience in the Era of Magnetic Resonance-Guided Adaptive Brachytherapy. // JCO Glob Oncol. – 2021. – P. 1602–1609. – <https://doi.org/10.1200/GO.21.00147>
8. Faye M.D., Petruccelli Araujo M., Wissing M.D., Alrabiah K. [et al.]. Safety and Efficacy of 2D Brachytherapy vs. 3D Image-Guided Adaptive Brachytherapy for Locally Advanced Cervical Cancer-A Single Institution Retrospective Study. // Curr Oncol. – 2023. – Vol. 30 (5) – P. 4966–4978. – <https://doi.org/10.3390/curroncol30050375>
9. Mahantshetty U., Poetter R., Beriwal S., Grover S., Lavanya G. [et al.]. IBS-GEC ESTRO-ABS recommendations for CT based contouring in image guided adaptive brachytherapy for cervical cancer. // Radiother Oncol. – 2021. – Vol. 160. – P. 273–284. – <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2021.05.010>
10. Wang K., Wang J., Jiang P. High-Dose-Rate Three-Dimensional Image-Guided Adaptive Brachytherapy (3D IGABT) for Locally Advanced Cervical Cancer (LACC): A Narrative Review on Imaging Modality and Clinical Evidence. // Curr Oncol. – 2023. – Vol. 31(1). – P. 50–65. – <https://doi.org/10.3390/curroncol31010004>
11. Dosimetry in Brachytherapy – An International Code of Practice for Secondary Standards Dosimetry Laboratories and Hospitals. Technical reports series no.492 // IAEA. – 2025.
12. International Commission on Radiation Units and Measurements, Prescribing, Recording, and Reporting Brachytherapy for Cancer of the Cervix – ICRU Report 89 – 2013.
13. Pötter R., Tanderup K., Schmid M.P. [et al.] EMBRACE Collaborative Group. MRI-guided adaptive brachytherapy in locally advanced cervical cancer (EMBRACE-I): a multicenter prospective cohort study. // Lancet Oncol. – 2021. – Vol. 22(4). – P. 538–547. – [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(20\)30753-1](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(20)30753-1)
14. Petric P., Lindegaard J.C., Sturdza A., Fokdal L., Kirchner K. [et al.]. Results of image guided brachytherapy for stage IB cervical cancer in the RetroEMBRACE study // Radiother. Oncol. – 2021. – Vol. 157. – P. 24–31. – <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2021.01.005>
15. Zhou N., Beavis A.L., Lin L.L., Neibart S.S., Chino J. [et al.]. Embracing and implementing the WHO cervical cancer elimination campaign goals: A consensus statement by SGO, ACOG, ASCCP, ASTRO, and ABS on minimum quality care standards for cervical cancer patients in the U.S. // Gynecol Oncol. – 2025. – Vol. 200. – P. 193–202. – <https://doi.org/10.1016/j.ygyno.2025.08.007>
16. Lindegaard J.C., Kirisits C., Schmid M.P., Wulff C.N., Steen S.G., Kristoffersen K.B., Pötter R., Petric P. Impact of Patient Selection on Real-World Outcomes by Using the EMBRACE-II Treatment Protocol in Locally Advanced Cervical Cancer // Int. J. Radiat. Oncol. Biol. Phys. – 2025. – Vol. 123(3) – P. 669–680. – <https://doi.org/10.1016/j.ijrobp.2025.05.068>
17. Serban M., Spampinato S., de Leeuw A., Fortin I., Kirisits C., Ye XY., Schmid M. [et al.]. Evaluation of brachytherapy applicators and their association with morbidity and local control in cervix cancer: An EMBRACE I analysis // Radiother Oncol. – 2025. – Vol. 210. – Art. 110954. – <https://doi.org/10.1016/j.radonc.2025.110954>
18. Комплексный план по борьбе с онкологическими заболеваниями в Республике Казахстан на 2023–2027 годы : утвержден постановлением Правительства Республики Казахстан от 29 ноября 2023 года № 1058. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300001058> (дата

обращения: 22.11.2025). [Kompleksnyy plan po bor'be s onkologicheskimi zabolevaniyami v Respublike Kazakhstan na 2023–2027 gody : utverzhden postanovleniem Pravitel'stva Respubliki Kazakhstan ot 29 noyabrya 2023 goda No. 1058. – URL: <https://adilet.zan.kz/rus/docs/P2300001058> (date of access: 22.11.2025).]

19. Doudoo C.O., Gyekye P.K., Emi-Reynolds G. [et al.]. Dose and secondary cancer-risk estimation of patients undergoing high dose rate intracavitary gynecological brachytherapy // J. Med. Imaging Radiat. Sci. – 2023. – Vol. 54(2). – P. 335–342. – <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2023.03.031>

КЛИНИКАЛЬК БРАХИТЕРАПИЯДА 2D ЖӘНЕ 3D ЖОСПАРЛАУДЫҢ ФИЗИКА-ДОЗИМЕТРИЯЛЫҚ ТАЛДАУЫ: СЕМЕЙ ҚАЛАСЫНДАҒЫ ЯДРОЛЫҚ МЕДИЦИНА ЖӘНЕ ОНКОЛОГИЯ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ ТӘЖІРИБЕСІ

**А. Д. Түсүпова^{1,2}, С. М. Айтқалиев¹, Ж. Қ. Айтқалиев¹, М. Т. Идинов^{1,2}, С. З. Танатаров¹,
Л. Б. Кенжина^{1*}, О. А. Степанова², Н. А. Елемесова¹, А. Д. Мергенбаева¹, А. К. Есенғари¹**

¹ Абай облысы ДСБ «Ядролық медицина және онкология орталығы» КМК, Семей, Қазақстан

² «Шәкәрім университеті» КеАҚ, Семей, Қазақстан

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

Мақалада жатыр мойнының жергілікті таралған қатерлі ісігі бар 20 пациентке жүргізілген жоғары дозалы брахитерапияны жоспарлаудың екі өлшемді (2D) және үш өлшемді (3D) тәсілдері арасындағы айырмашылықтарға ретроспективті физика-дозиметриялық талдау ұсынылған. Зерттеу 2023–2025 жылдары Абай облысының Ядролық медицина және онкология орталығының базасында жүргізіліп, GammaMed Plus iX жүйесі мен BrachyVision бағдарламалық кешенін қолдана отырып орындалған әрқайсысы 10 жоспардан тұратын екі тәуелсіз когортаны қамтыды. Әдістеменің негізгі ерекшелігі КТ-топометрия үшін арнайы провайдер-столды қолдану болды, ол индексирленген позициялау технологиясын қамтамасыз етіп, 3D-жоспарлауға дайындық кезінде геометриялық қателіктерді болдырмауға мүмкіндік берді. Зерттеудің мақсаты 3D-жоспарлауға көшу кезінде клиникалық мақсатты көлемнің дозалық қамтылуындағы және тәуекелді ағзаларға түсетін дозалық жүктемелердегі айырмашылықтарды сандық бағалау болды. Әдістемелік салыстырмалылықты қамтамасыз ету мақсатында GEC-ESTRO ұсынымдары мен ICRU Report 89 талаптарына сәйкес 2D-топтағы 10 жоспар үшін архивтік КТ кескіндерінде жоғары қауіп төндіретін клиникалық мақсатты көлем (HR-CTV) мен тәуекелді ағзалар (OAR) ретроспективті түрде контурланып, көлемдік дозиметриялық параметрлер қайта есептелді. Талдаудың негізгі көрсеткіштері HR-CTV D90 және OAR D2cc (қуық, тік ішек және сигма тәрізді ішек үшін) болды. Тәуелсіз таңдамаларға жүргізілген статистикалық талдау прецизиялық мишеньді фиксациямен қамтамасыз етілген 3D-жоспарлау HR-CTV D90 вариабельділігінің төмендеуімен, дозалық таралымның конформдылығының артуымен және тәуекелді ағзалардағы көлемдік дозалық жүктемелерді дәл бағалау мүмкіндігімен байланысты екенін көрсетті. Алынған нәтижелер халықаралық ұсынымдарға сәйкес келеді және Қазақстанның онкологиялық практикасында брахитерапияның дәлдігін, сапасын және қауіпсіздігін арттыруға бағытталған үш өлшемді жоспарлаудың артықшылықтарын айқындайды.

Түйін сөздер: медициналық физика, жатыр мойны обыры, брахитерапия, иридий-192, 3D-жоспарлау, 2D-жоспарлау, жоғары қауіп төндіретін клиникалық мақсатты көлем (HR-CTV), тәуекелді ағзалар (OAR).

PHYSICO-DOSIMETRIC ANALYSIS OF 2D AND 3D TREATMENT PLANNING
IN CLINICAL BRACHYTHERAPY: EXPERIENCE OF THE CENTER FOR NUCLEAR MEDICINE
AND ONCOLOGY (SEMEY, KAZAKHSTAN)

A. D. Tussupova^{1,2}, S. M. Aitkaliyev¹, Zh. Қ. Aitkaliyev¹, M. T. Idinov^{1,2}, S. Z. Tanatarov¹,
L. B. Kenzhina^{1*}, O. A. Stepanova², N. A. Elemessova¹, A. D. Mergenbayeva¹, A. K. Essengari¹

¹ “Center of Nuclear Medicine and Oncology” of Abay Regional Health Department, Semey, Kazakhstan

² NP JSC “Shakarim University”, Semey, Kazakhstan

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

This study presents a retrospective physico-dosimetric analysis of differences between two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) treatment planning approaches in high-dose-rate (HDR) brachytherapy for 20 patients with locally advanced cervical cancer. The research was conducted at the Center for Nuclear Medicine and Oncology of the Abai Region between 2023 and 2025 and included two independent cohorts of 10 treatment plans each, generated using the GammaMed Plus iX after loading system and the BrachyVision treatment planning software. A key methodological feature of the study was the use of a dedicated CT topometric provider table, enabling indexed patient positioning and eliminating geometric uncertainties during preparation for 3D treatment planning. The aim of the study was to quantitatively assess differences in clinical target volume coverage and dose exposure to organs at risk during the transition to 3D planning. To ensure methodological comparability, in accordance with GEC-ESTRO recommendations and ICRU Report 89, retrospective contouring of the high-risk clinical target volume (HR-CTV) and organs at risk (OARs) was performed on archived CT images for the 10 plans in the 2D cohort, followed by recalculation of volumetric dosimetric parameters. The primary dosimetric endpoints included HR-CTV D90 and OAR D2cc for the bladder, rectum, and sigmoid colon. Statistical analysis of independent samples demonstrated that 3D planning, supported by precise target fixation, is associated with reduced variability of HR-CTV D90, improved dose distribution conformity, and the ability to accurately assess volumetric dose exposure to organs at risk. The obtained results are consistent with international guidelines and highlight the advantages of three-dimensional planning in improving the accuracy, quality, and safety of brachytherapy in oncological practice in Kazakhstan.

Keywords: *medical physic, cervical cancer, brachytherapy, iridium-192, 3D planning, 2D planning, high-risk clinical target volume, organs at risk.*