

ОЦЕНКА ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТРЁХМЕРНОГО МАССИВА ДЕТЕКТОРОВ К СПЕЦИАЛЬНО ВНЕДРЁННЫМ ОШИБКАМ В ПАРАМЕТРАХ МЛК ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЛУЧЕВОЙ ТЕРАПИИ С МОДУЛЯЦИЕЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Ю.С. Ларькин, Т.А. Крылова, И.М. Лебеденко, М.П. Шатенок
Национальный медицинский исследовательский центр онкологии
им. Н.Н. Блохина Минздрава России, Москва

ASSESSMENT OF THE SENSITIVITY OF A THREE-DIMENSIONAL ARRAY OF DETECTORS TO SPECIALLY INTRODUCED ERRORS IN THE MLC PARAMETERS DURING INTENSITY MODULATION RADIATION THERAPY

Y.S. Larkin, T.A. Krylova, I.M. Lebedenko, M.P. Shatenok
N.N. Blokhin National Medical Research Center of Oncology, Moscow, Russia

Реферат

Цель: Оценить чувствительность трехмерного массива детекторов Arc Check к специально введенным ошибкам в параметрах МЛК при проведении ЛТМИ.

Материал и методы: Проведена верификация планов облучения как с ошибками, так и без введенных ошибок на аппарате Clinac 6 EX (Varian, США) с помощью трехмерного массива детекторов Arc Check (Sun Nuclear, США).

Результаты: Подготовлены планы ЛТМИ на СП Eclipse для различных локализаций в соответствии с рекомендациями AAPM TG 119. Созданы и внедрены ошибки в положения пластин МЛК для дальнейшего внедрения в планы ЛТМИ. Разработана компьютерная программа на базе кода C++ для автоматического внедрения ошибок в файлы МЛК. Проведен анализ результатов верификации и оценена чувствительность системы Arc Check к ошибкам в параметрах МЛК.

Заключение: Показано, что чувствительность Arc Check к введенным ошибкам зависит от вида ошибки. Чувствительность к детектированию специально введенных ошибок возрастает при использовании более строгого гамма-критерия и при увеличении значения сдвига. Выявлены ошибки во всех планах для ошибок первого и второго типа при отклонениях 2 мм и 4 мм. Наблюдается слабая чувствительность для ошибок двух типов при сдвиге пластин МЛК на 1 мм, так как данный сдвиг совпадает с допуском отклонений.

Ключевые слова: лучевая терапия с модуляцией интенсивности, положения МЛК, введенные ошибки, массив детекторов

Abstract

Purpose: To evaluate the sensitivity of the three-dimensional Arc Check detector array to intentionally introduced errors in MLC position during patient specific QA intensity-modulated radiotherapy (IMRT).

Materials and methods: Verification of treatment plans (both with introduced errors and without ines) was performed using the Clinac 6 EX linear accelerator (Varian, USA) and the ArcCheck three-dimensional detector array (Sun Nuclear, USA).

Results: IMRT plans for various anatomical sites were created in the Eclipse treatment planning system (TPS) following AAPM TG 119 recommendations. Errors in MLC leaf positioning (1 mm, 2 mm, and 4 mm shifts) were artificially introduced in to the plans. A custom C++-based soft ware tool was developed to automate error in sertion into MLC position files. Verification results were analyzed to evaluate the sensitivity of the Arc Check system to MLC parameter errors.

Conclusion: The sensitivity of Arc Check to errors depends on the error type. Detection sensitivity increases with stricter gamma criteria (e.g., 2 %/2 mm vs. 3 %/3 mm) and larger leaf displacements (≥ 2 mm). Errors of 2 mm and 4 mm were reliably detected across all plans for both error types. Weak sensitivity was observed for 1 mm shifts, as this aligns with the MLC tolerance threshold (1 mm).

Key words: intensity modulated radiotherapy, MLC position, embedded errors, detector array

E-mail: imlebedenko@mail.ru

<https://doi.org/10.52775/1810-200X-2025-106-2-92-101>

Введение

В работе оценивается чувствительность переносного трёхмерного массива детекторов, предназначенного для верификации планов дистанционной лучевой терапии, к внедренным ошибкам для фотонных пучков с модулированной интенсивностью.

Актуальность работы обусловлена необходимостью применения различных обеспечивающих контроль качества ускорителей измерительных средств, которые необходимо проверять на способность выявлять ошибки при верификации планов облучения. Возможные ошибки в работе МЛК могут оказаться критическими при реализации ЛТМИ для пациентов [1–4]. Так, например, в [1] сообщается об одном из случаев радиационной аварии, произошедшем в госпитале Нью-Йорка. Ответственный физик не смог отследить ошибку, возникшую на этапе сохранения плана ЛТМИ и передачи его на ускоритель. В результате пациенту было проведено облучение с полностью открытым (максимальным) полем, после которого в результате развившихся лучевых реакций больной умер.

На современном рынке оборудования из-за большого количества средств, необходимых для гарантии качества (ГК) ЛТМИ, сложно выбрать оптимальный и наиболее эффективный метод верификации [5]. Процедура верификации плана облучения представляет собой процесс сравнения рассчитанных на СП дозовых распределений с измеренными распределениями в специальном фантоме или в массиве детекторов. Поэтому, оценка чувствительности массива детекторов (в нашем случае Arc Check (Sun Nuclear, США)) к специально внедрённым ошибкам в параметрах МЛК при проведении ЛТМИ является актуальной задачей, решение которой поможет сделать вывод об эффективности предложенного средства верификации.

Цель исследования

Оценить чувствительность трёхмерного массива детекторов Arc Check к специально внедренным ошибкам в параметрах МЛК при проведении ЛТМИ.

В соответствии с поставленной целью были сформулированы следующие задачи:

- ✓ подготовить планы ЛТМИ на СП Eclipse для различных локализаций в соответствии с рекомендациями AAPM TG 119;
- ✓ разработать компьютерную программу на базе кода C++ для автоматического внедрения ошибок в файлы МЛК;
- ✓ провести верификацию подготовленных планов, как с ошибками, так и без них при облучении на аппарате Clinac 6 EX (Varian, США) с помощью трёхмерного массива детекторов Arc Check;
- ✓ провести анализ результатов верификации и оценить чувствительность системы Arc Check к ошибкам в параметрах МЛК.

Краткий обзор сведений по внедренным ошибкам МЛК

В работе [6] сказано, что допустимая величина отклонения пластин МЛК от заданного положения должна быть в пределах 1 мм. Поэтому рассмотрение этого граничного значения представляет большой интерес. Величины остальных сдвигов были выбраны исходя из данных в статьях [7–10]. Например, в работе [8] выполняли сравнительное исследование с внедрением ошибок различных устройств (поворота гантри, установки пластин МЛК более 2 мм и др.) и их регистрацией с использованием различных дозиметрических систем. Было показано, что выбранные дозиметрические системы демонстрируют разную чувствительность к внедрённым ошибкам, которая зависит от плана.

При этом в [8] использовали дозиметрические системы MARCHECK (PTW) и электронное устройство портальной визуализации (EPID). В результате получили зависимость чувствительности дозиметрических систем от гамма-критерия. Сделан вывод о том, что ни один из проверенных методов не является чувствительным при совокупности полей ЛТМИ к обнаружению систематического сдвига пластин МЛК в отдельном поле. Поэтому индивидуальный контроль качества плана облучения пациента не может заменить контроль качества самого МЛК.

В работе [9] исследовали чувствительность дозиметрических средств контроля к ошибкам многолепесткового коллиматора при объёмно модулированной арк-терапии (VMAT). В работе также внедряли ошибки позиционирования МЛК, но величина заданного сдвига была меньше допустимого и указанного в [6] отклонения и составляла 0,25, 0,5, 0,75 и 1 мм. Делается вывод о том, что гамма-критерий с величинами 2 %/2 мм более чувствительный, чем 3 %/3 мм.

В работе [10] исследовали влияние небольших систематических погрешностей и эффекта гравитации на дозовое распределение. Рассматривали три типа ошибок: 1) стороны МЛК сдвигались в противоположных направлениях, что приводило к большим полям; 2) обе стороны МЛК закрывали, что приводило к получению меньших полей; 3) обе стороны МЛК сдвигались в одном и том же направлении при развороте гантри для имитации воздействия силы тяжести на лепестки. Измерения оценивали по гамма-индексу 3 %/3 мм и 2 %/2 мм. Дозу в модифицированных планах пересчитывали, а гистограммы дозы для мишени и критических структур сравнивали с дозами неизмененных планов. Авторы показали, что при использовании критерия 3 %/3 мм и установке сдвига пластин МЛК 0,5 мм и 1 мм для планов облучения предстательной железы и опухолей головы/шеи соответственно, ошибки не идентифицируются. Рекомендовалось использовать более строгий критерий 2 %/2 мм.

В целях проверки специализированного дозиметрического оборудования для ЛТМИ в конкретном учреждении, в соответствии документом ESTRO [11], описаны способы верификации ЛТМИ. Подчёркивается, что иногда трудно определить причину различия между измеренным и запланированным распределением дозы, так как на величину различий оказывает влияние и передача данных в ускоритель, и

средства измерения, и величина выбранного критерия. Для идентификации причины наблюдаемого отклонения требуется знание каждой из составляющих, включая точность расчетов на СП, точность установки положения лепестков МЛК, характеристик оборудования, применяемого для контроля.

Рабочая группа AAPM TG-119 [12] разработала количественную величину доверительного интервала (confidence limit) результатов тестирования в качестве базового значения на этапе приемки и проверки метода ЛТМИ перед началом клинического применения. Был разработан набор контрольных примеров для оценки точности планирования и реализации ЛТМИ. В каждом тесте работы МЛК использовали контуры мишени и критических структур, созданные в прямоугольных фантомах. Все тесты были спланированы, осуществлены, измерены и проанализированы на девяти различных системах планирования ЛТМИ. Соответствие между запланированными и измеренными дозами было определено с помощью ионизационной камеры в областях высокой и низкой дозы, с помощью пленочной дозиметрии во фронтальной плоскости в фантоме для всех назначенных полей и дозиметрии в плоскости, перпендикулярной центральной оси для каждого отдельного пучка. Распределение дозы в плоскости оценивали с использованием гамма-критерия 3 %/3 мм. Для определения доверительных интервалов (ДИ) результатов тестирования применяли среднее значение и стандартное отклонение σ , используя концепцию определения $ДИ = |\text{среднее}| + 1,96\sigma$. Разработанный тестовый протокол и результаты тестирования рекомендованы для использования и для других устройств в качестве базиса для сравнения с этой группой.

Материал и методы

В данной работе использован ускоритель Clinac 6 EX с номинальной энергией фотонного излучения 6 МэВ, мощность дозы 600 МЭ/мин, максимальное поле облучения 40×40 см. Для расчета использован алгоритм AAA (анизотропный аналитический алгоритм) системы планирования Eclipse. К планам ЛТМИ, созданным в системе планирования Eclipse, применяется алгоритм оптимизации объёма дозы (DVO – Dose Volume Optimizer) для обратного планирования полей IMRT [13].

Внедрение ошибок положения МЛК

В табл. 1, в соответствии с рекомендациями TG-119 [12], приведены ошибки двух типов, внедренные авторами в планы для опухолей наиболее распространенных локализаций.

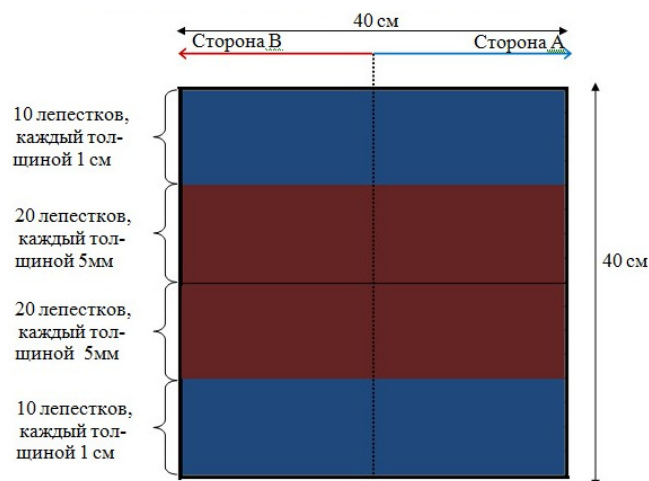
Исходя из публикаций [7–10, 14] и основываясь на докладах [6, 11, 12], были выбраны ошибки двух типов и соответствующие им величины сдвигов лепестков МЛК. Для наглядного изображена условная схема МЛК (рис. 1). Центральная ось соответствует оси симметрии расположения пластин МЛК относительно оси пучка. Края пластин МЛК в этом исходном положении на самом деле не смыкаются, а расположены в пределах одного миллиметра относительно оси симметрии (по данным приемо-сдаточных испытаний). Тем не менее, на рисунке мы условно изобразили правую и левую зоны расположения пластин сомкнутыми.

Ошибки первого типа могут возникнуть при неправильной калибровке, при этом изменится облучаемый объем, пострадают здоровые органы и ткани. При ошибках второго типа ошибки противоположные лепестки МЛК раздвигаются в разные стороны. Пластины А смещаются относительно своего исходного положения в правую сторону, а лепестки В смещаются относительно своего положения в левую сторону. При этом с увеличением расстояния между стороной А и стороной В поглощённая доза увеличивается. Для того чтобы сдвинуть все лепестки в правую сторону, необходимо из значения, соответствующего положению лепестков В, вычесть величину сдвига, а к значению, соответствующему положению лепестков А, прибавить величину сдвига. Для того, чтобы раздвинуть все пластины, надо к значениям, соответствующим положениям лепестков А и В, прибавить величину сдвига.

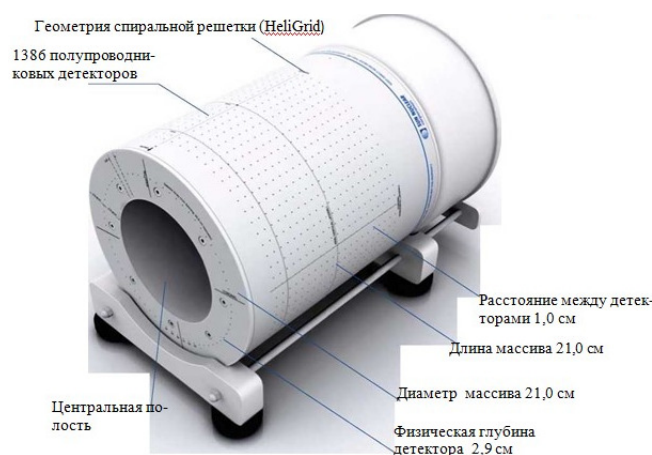
Изображение массива детекторов Arc Check для верификации планов облучения из полиметилметакрилата (ПММА), используемого для выявления ошибок, и некоторые характеристики приведены на рис. 2. Arc Check – матрица полупроводниковых детекторов, специально предназначенная для проверки планов с модуляцией интенсивности в ротационном режиме работы ускорителя, ее форма максимально приближена к идеальной форме тела пациента (рис. 3). Детекторы расположены по спирали, что увеличивает частоту дискретизации и уменьшает перекрытие и затенение детекторов BEV.

Таблица 1**Типы внедренных ошибок**

Тип ошибки	Модификация МЛК	Величина сдвига, мм		
1 случай	Лепестки А и В сдвигаются вправо	1	2	4
2 случай	Лепестки А и В сдвигаются в разные стороны (А – вправо, В – влево)	1	2	4

**Рис. 1. Схема МЛК**

3D массив Arc Check обладает преимуществами перед 2D матрицами, зафиксированными на терапевтическом столе. Геометрия детектора по отношению к BEV (вид из пучка) остаётся постоянной. Возможно обнаружение очень маленьких ошибок угла поворота. Напротив, при облучении 2D матрицы и отсутствии эффекта затенения детектора (при наклонном пучке) значительная информация теряется в

**Рис. 2. Массив детекторов ArcCheck**

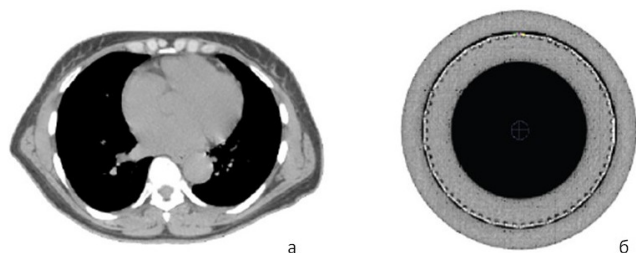


Рис. 3. Arc Check – матрица полупроводниковых детекторов, специально предназначенная для проверки планов с модуляцией интенсивности в ротационном режиме работы ускорителя – б; ее форма максимально приближена к идеальной форме тела пациента – а

2D массиве, а ошибки до 10° пропускаются в 75 % случаев [7–10]. В отличие от 2D массив детекторов, Arc Check позволяет оценить дозовое распределение по всей поверхности цилиндра. Развертка дозового распределения по углам при облучении на ускорителе массива детекторов Arc Check приведена на рис. 4. На площади Arc Check 10×10 см² содержится 221 детектор (рис. 5). Измеряется входная и выходная доза, эффективно удваивая плотность детектора в поле измерения. Arc Check самостоятельно вычисляет угол гантри, используя входную и выходную дозу. Виртуальный уклономер работает с погрешностью $\pm 0,5^\circ$.

Расхождение между измеренными и рассчитанными данными оценивалось по гамма-критерию. Гамма-анализ позволяет проводить совместную проверку пространственного отклонения и отличия по измеренной и рассчитанной дозе. Рекомендованы следующие параметры индексации для проведения оценки планов облучения: расхождение в абсолютном значении дозы (dose difference) – 3 % (5 % для стереотаксического облучения); расхождение в расстоянии между точками с одинаковыми значениями дозы (distance to agreement) – 3 мм (2 мм для стереотаксического облучения); критерий приемлемости результата верификации – площадь точек с гамма-индексом более 1 по отношению к общему числу точек оценки плана <10 %. Однако в данной работе рассматривался также более жесткий критерий – 2 % и 2 мм.

Для проведения количественных оценок подготовлен набор тестовых планов ЛТМИ в соответствии с TG 119, а именно “тест скорости”, “предстательная железа”, “голова-шея”, “много мишеней” (multitarget), C-shape. Затем для этих планов рассчитывали дозовые распределения по методике sliding window IMRT на СП Eclipse.

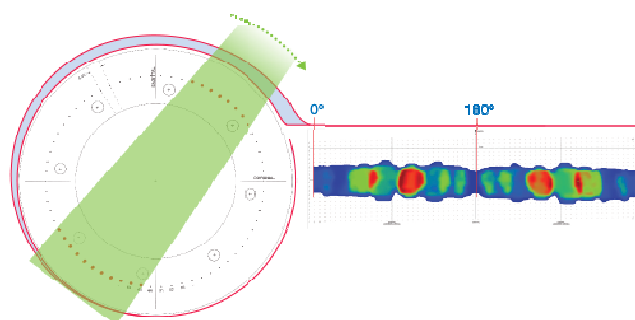


Рис. 4. Развертка дозового распределения по углам при облучении на ускорителе массива детекторов Arc Check

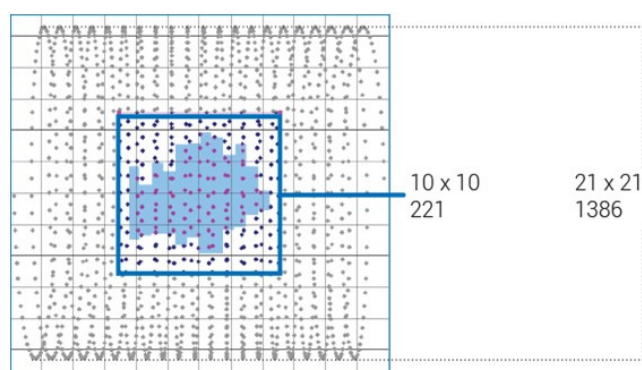


Рис. 5. Расположение детекторов в пучке Arc Check BEV (вид из пучка)

Далее файлы движения МЛК из СП экспортировались в персональный компьютер со специально разработанным программным обеспечением (ПО). Следующим этапом было получение планов с внедрёнными ошибками (получение файлов МЛК с ошибками с помощью ПО). Далее проводили облучение на ускорителе массива полупроводниковых детекторов Arc Check по планам с внедрённой ошибкой. В итоге были получены измеренные дозовые распределения (с ошибками), которые и были сопоставлены с рассчитанными данными без ошибок. Разработана программа на базе кода C++ с помощью библиотеки WPF, позволяющая имитировать возможные ошибки в реальной работе МЛК.

Результаты

Проведен анализ и определены параметры возможных ошибок МЛК. В первом случае пластины А и В смещали в правую сторону относительно оси симметрии. Во втором случае все лепестки раздвигали в разные стороны от-

носителем оси. То есть лепестки В смещали влево, лепестки А смещали вправо. Определены количественные параметры ошибок МЛК: ошибки позиционирования лепестков составляют сдвиг 1, 2, 4 мм. Результаты сравнения абсолютных и относительных доз для тестового плана и расчет погрешностей приведены в табл. 2. В табл. 2 первые цифры (1, 2) обозначают случаи из табл. 1, вторые цифры (после черточки) обозначают величину смещения в мм. Оценка результатов проводилась в программе SNC Patient, в которую загружались импортированные из системы планирования Eclipse сведения об измеренных и рассчитанных дозовых распределениях. Программе SNC Patient предлагает несколько способов сравнения. В работе использовали RD (relative dose – относительная доза) и AD (absolute dose – абсолютная доза). Затем выбирали гамма-критерии. На следующем шаге рассчитывается процент точек, отклонение от которых удовлетворяло установленному критерию. Результаты верификации, полученные с помощью программного обеспечения SNC Patient для гамма-критериев: γ -2 %/2 мм, γ -3 %/3 мм и γ -4 %/4 мм, для примера, для тестового плана Multitarget, иллюстрированы в табл. 2. Ввиду цифровой монотонности таблицы сведения для других тестов здесь не приведены.

Для определения, в каких случаях ошибки можно считать выявленными, а в каких нет, использовали пороговую чувствительность Arc Check. Пороговая чувствительность – характеристика средства измерений в виде наиме-

ньшего значения изменения физической величины, начиная с которого может осуществляться её измерение данным средством. Чувствительность определялась как величина, прямо пропорциональная проценту точек, не прошедших по гамма-критерию. Величина порога чувствительности определялась из результатов сравнения по гамма-методу для планов без ошибок. Ошибка считалась выявленной, если процент точек, не прошедших по гамма-критерию, в случае с RD превысил значение 8 % для критерия 2 %/2 мм, 2 % – для критерия 3 %/3 мм, а в случае с AD – превысил значение в 12 % для критерия 3 %/3 мм и 7 % для критерия 4 %/4 мм. Для лучшего понимания полученных в таблице результатов построены гистограммы (рис. 6–9). Первые две (рис. 6, 7) относятся к Relative Dose, гистограммы рис. 8, 9 – к Absolut Dose.

Оценка по методу RD наиболее достоверна. Это связано с тем, что AD зависит от абсолютной калибровки аппарата (погрешность до 2 %) и специфики калибровки по абсолютной дозе Arc Check (погрешность до 2 %). При сравнении по RD оценивается исключительно разница в форме дозового распределения. Для критерия 2 %/2 мм (рис. 6) наблюдается чёткая закономерность увеличения чувствительности устройства Arc Check при увеличении значения сдвига лепестков МЛК, для ошибок как первого, так и второго типа. Из диаграммы видно, что для планов без изменений чувствительность отсутствует. Также наблюдается слабая чувствительность для ошибок обоих типов

Таблица 2

**Результаты сравнения абсолютных и относительных доз для тестового плана
и расчет погрешностей**

Локализация	Сдвиг лепестка	Статус	γ – 2 %/2 мм		γ – 3 %/3 мм		γ – 4 %/4 мм	
			Гамма RD	Гамма AD	Гамма RD	Гамма AD	Гамма RD	Гамма AD
(много мишеней)	Без ошибки	Pass %	94±0,6	82±1	99±0,3	92±0,7	100±0	97±0,5
		Fail %	6±0,6	18±1	1±0,3	8±0,7	0±0	3±0,5
	1_1 мм	Pass %	90±0,8	83±1	98±0,4	89±0,8	99±0,3	93±0,7
		Fail %	10±0,8	17±1	2±0,4	11±0,8	1±0,3	7±0,7
	1_2 мм	Pass %	80±1,1	67±1,3	92±0,7	84±1	97±0,5	93±0,7
		Fail %	20±1,1	33±1,3	8±0,7	16±1	3±0,5	7±0,7
	1_4 мм	Pass %	54±1,3	44±1,3	70±1,2	61±1,3	82±1	74±1,2
		Fail %	46±1,3	56±1,3	30±1,2	39±1,3	18±1	26±1,2
	2_1 мм	Pass %	92±0,7	39±1,3	99±0,3	68±1,3	100±0	80±1,1
		Fail %	8±0,7	61±1,3	1±0,3	32±1,3	0±0	20±1,1
	2_2 мм	Pass %	77±1,1	19±1,1	93±0,7	35±1,3	98±0,4	51±1,3
		Fail %	23±1,1	81±1,1	7±0,7	65±1,3	2±0,4	49±1,3
	2_4 мм	Pass %	58±1,3	5±0,6	72±1,2	10±0,8	83±1	18±1
		Fail %	42±0	95±0	28±0	90±0	17±0	82±0

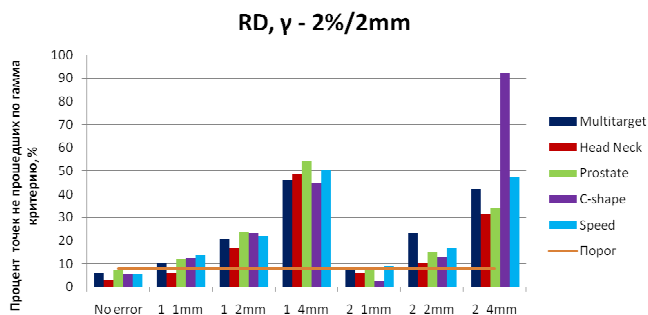


Рис. 6. Гамма-анализ по методу RD с гамма-критерием 2 %/2 мм

при смещении на 1 мм, так как сдвиг совпадает с допустимым отклонением. При отклонениях 2 мм и 4 мм для всех планов ошибки были выявлены.

Для критерия 3 %/3 мм (рис. 7) наблюдается похожая на критерий 2 %/2 мм закономерность увеличения чувствительности при увеличении значения сдвига лепестков МЛК, для ошибок как первого, так и второго типа. Однако в этом случае не была выявлена ошибка второго типа при сдвиге лепестков на 2 мм для всех планов HeadNeck и C-shape. Для критерия 4 %/4 мм наблюдается похожая на предыдущие критерии закономерность увеличения чувствительности при увеличении значения сдвига лепестков МЛК для ошибок обоих типов. Из диаграммы видно, что чувствительность отсутствует для плана Multitarget при сдвиге 2 мм для ошибки первого типа и для планов Multitarget, Speed при сдвиге 1 мм также для ошибки первого типа.

Оценка по методу AD (рис. 8, 9) показывает намного больший, чем для RD, процент точек, не прошедших по гамма-критерию. Для критерия 3 %/3 мм планы с ошибками первого типа при сдвиге 1 мм были выявлены, но показали результат, близкий к порогу чувствитель-

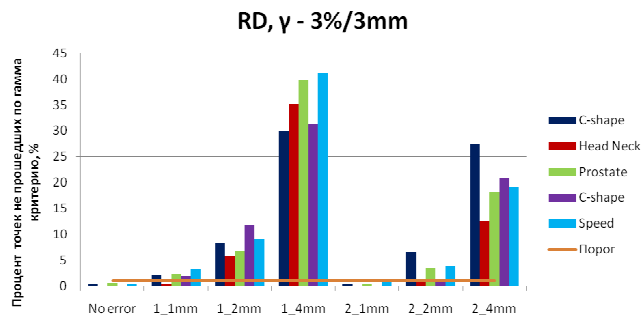


Рис. 7. Гамма-анализ по методу RD с гамма-критерием 3 %/3 мм

ности, планы с остальными ошибками уже были выявлены. Критерий 3 %/3 мм менее строгий по сравнению с критерием 2 %/2 мм. Для критерия 4 %/4 мм порог чувствительности не превышен для планов без ошибок. Планы с ошибками первого типа при сдвиге 1 мм и 2 мм были выявлены, но показали результат, близкий к порогу чувствительности. Планы с остальными ошибками уже были выявлены. Критерий 4 %/4 мм менее строгий по сравнению с предыдущими критериями.

Обсуждение

На результат верификации выражено влияет тип рассматриваемой ошибки. При втором типе пластины МЛК раздвигаются и соответственно увеличивается поглощённая доза и процент не прошедших по гамма-критерию точек. Также на результат верификации влияет величина сдвига лепестков МЛК. Например, при сдвиге лепестков МЛК на 4 мм процент точек, не прошедших по гамма-критерию, в несколько раз больше чем при сдвиге 1 мм или 2 мм. Кроме этого, на результат верификации влияет величина используемого гамма-критерия.

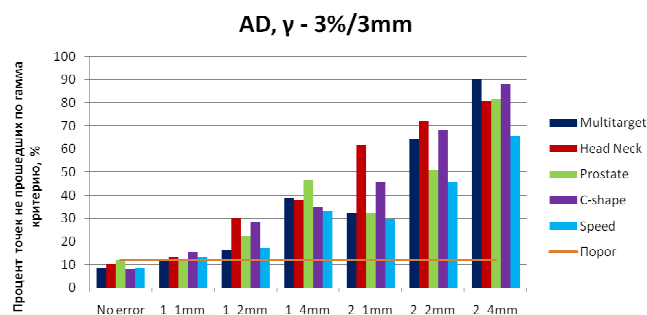


Рис. 8. Гамма-анализ по методу AD с гамма-критерием 3 %/3 мм

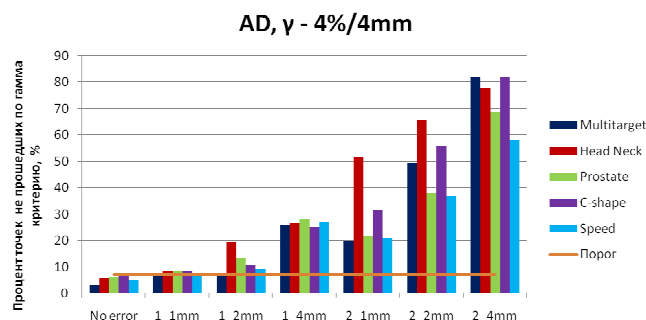


Рис. 9. Гамма-анализ по методу AD с гамма-критерием 4 %/4 мм

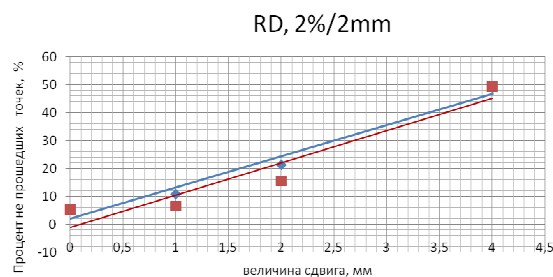


Рис. 10. Гамма-анализ по методу RD с гамма-критерием 2 %/2 мм

рия. При использовании гамма-критерия 2 %/2 мм чувствительность оценки возрастает. При использовании критерия 3 %/3 мм не выявлена ошибка второго типа по методу RD при сдвиге лепестков на 2 мм для тест-планов Head& Neck и C-shape.

Полученные результаты усреднили и аппроксимировали в виде выраженных линейных функций (синий и красный цвет для ошибок первого и второго типа соответственно). Из графиков рис. 10–13 совершенно очевидно, что чувствительность устройства Arc Check прямо пропорциональна проценту точек, не прошедших по гамма-критерию. Для количественного определения чувствительности нами получены соответствующие коэффициенты линейных зависимостей.

При рассмотрении графиков рис. 10–13 можно сделать следующие заключения.

По данным оценок по относительной дозе RD (рис. 10, 11):

- ✓ с гамма-критериями 3 %/3 мм и 2 %/2 мм для ошибок двух типов при сдвиге лепестков МЛК на 2 мм и 4 мм ошибки были выявлены для всех планов, кроме ошибки второго типа при сдвиге лепестков на 2 мм для гамма-критерия 3 %/3 мм, где чувствительность наблюдалась для более строгого гамма-критерия 2 %/2 мм;
- ✓ с гамма-критерием 4 %/4 мм были выявлены ошибки только для сдвига лепестков на 4 мм;
- ✓ при использовании гамма-критерия 3 %/3 мм и 4 %/4 мм не была выявлена ошибка первого типа при сдвиге лепестков на 1 мм для всех планов, а при использовании гамма-критерия 2 %/2 мм данная ошибка была выявлена для всех планов, кроме плана Head Neck.

По данным оценок по абсолютной дозе AD (рис. 12, 13) можно сказать следующее:

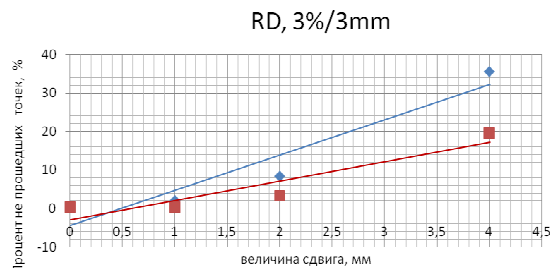


Рис. 11. Гамма-анализ по методу RD с гамма-критерием 3 %/3 мм

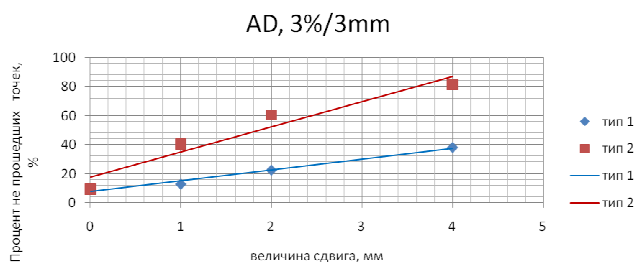


Рис. 12. Гамма-анализ по методу AD с гамма-критерием 3 %/3 мм

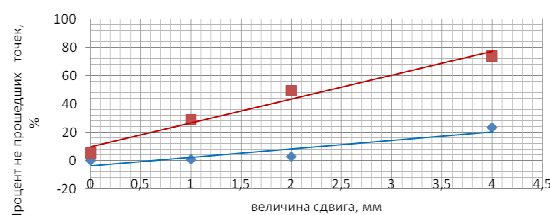


Рис. 13. Гамма-анализ по методу AD с гамма-критерием 4 %/4 мм

- ✓ с гамма-критериями 4 %/4 мм, 3 %/3 мм для ошибок всех типов и всех планов процент точек, не прошедших по гамма-критерию, превысил соответствующие значения по методу RD;
- ✓ при использовании гамма-критериев 3 %/3 мм и 4 %/4 мм все ошибки были выявлены, кроме случаев с планами Multitarget для ошибки первого типа при сдвиге 1 мм при гамма-критерии 3 %/3 мм; и планов Speed, Multitarget и Speed для ошибки первого типа при сдвиге 1 мм при гамма-критерии 4 %/4 мм, а также Multitarget для первого типа ошибки при сдвиге 2 мм при гамма-критерии 4 %/4 мм.

На основании проведенного анализа составлена табл. 3 тех планов, для которых при разных гамма-критериях и разных типах ошибок чувствительность отсутствовала.

Таблица 3

Случаи невыявленной чувствительности

Тип ошибки	Сдвиг	RD		AD	
		2 %/2 мм	3 %/3 мм	3 %/3 мм	4 %/4 мм
1	1 мм	HeadNeck	HeadNeck	Multitarget, Prostate	Multitarget, Speed
	2 мм				Multitarget
2	1 мм	все планы	все планы		
	2 мм		HeadNeck, C-shape		

Выводы

На основании сравнения измеренных и рассчитанных дозовых распределений с помощью гамма-метода при критериях 2 %/2 мм 3 %/3 мм и 4 %/4 мм сделаны следующие выводы.

1. Чувствительность Arc Check к внедренным ошибкам зависит от вида ошибки.
2. Чувствительность к детектированию специально внедренных ошибок возрастает при использовании более строгого гамма-критерия и при увеличении значения сдвига.
3. Выявлены ошибки первого и второго типа для всех планов при отклонениях 2 мм и 4 мм.
4. Наблюдается слабая чувствительность для ошибок двух типов при сдвиге пластин МЛК на 1 мм, так как данный сдвиг совпадает с допуском отклонений.
5. При исследовании результатов верификации не обнаружено явной зависимости от типа плана, рекомендованного для верификации в документе AAPMTG-119.
6. Результаты оценки чувствительности массива детекторов Arc Check к наличию специально внедренных ошибок, полученные в данной работе, можно считать удовлетворительными.

Список литературы

1. Bogdanich W. Radiation offers newcures, and new ways to do harm. New York Times. 2010; 15.
2. Patient safety in an environment of rapidly advancing technology in radiation therapy. Med. Phys. 2014; 39: 2: 61-3. <https://doi.org/10.4103/0971-6203.131276/>
3. Bogdanich W. Radiation Boom-as technology surges radiation safeguards lag. New York Times. 2010; 27.
4. Наркевич БЯ, Костылёв ВА, Левчук АВ и др. Радиотерапевтические риски и радиационные аварии в лучевой терапии. Медицинская физика. 2009; 1: 31-8. Narkevich BY, Kostylev VA, Levchuk AV, et al. Radiotherapeutic risks and radiation accidents in radiation therapy. Medical Physics. 2009; 1: 31-8 (In Russ).
5. User's Guide Arc CHECK™. Sun Nuclear Corporation. 2009.
6. Klein EE, Hanley J, Bayouth J, et al. AAPM TG-142: Quality assurance of medical accelerators. Med. Phys. 2009; 36: 9: 4197-212. <https://doi.org/10.1118/1.3190392>.
7. Rangel A, Palte G, Dunscombe P. The sensitivity of patient specific IMRT QC to systematic MLC leaf bank offset errors. Med. Phys. 2010; 37: 3862-7. <https://doi.org/10.1118/1.3453576>.
8. Fredh A, Scherman JB, Fog LS, et al. Patient QA systems for rotational radiation therapy: A comparative experimental study with intentional errors. Med. Phys. 2013; 40: 3: 031716: 1-9. <https://doi.org/10.1118/1.4788645>.
9. Coleman L, Skourou C. Sensitivity of volumetric modulated arc therapy patient specific QA results to multileaf collimator errors and correlation to dose volume histogram based metrics. Med. Phys. 2013; 40: 11: 111715: 1-7. <https://doi.org/10.1118/1.4824433>.
10. Heilemann G, Poppe B, Laub W. On the sensitivity of common gamma-index evaluation methods to MLC misalignments in Rapidarc quality assurance. Med. Phys. 2013; 40: 3: 031702: 1-12. <https://doi.org/10.1118/1.4789580>.
11. Guidelines for the verification of IMRT. ESTRO Guidebook 9. 2008.
12. AAPM TG-119: IMRT Commissioning Tests Instructions for Planning, Measurement, and Analysis. 2009. Version 10.21. <http://www.aapm.org/pubs/tg119/default.asp>.
13. Algorithm for correcting optimization convergence errors in Eclipse. Journal of Applied

Clinical Medical Physics. 2009; 10:1: 281-9.

<https://doi.org/10.1120/jacmp.v10i4.3061>.

14. Шатенок МП, Коростин ИН, Крылова ТА и др. Чувствительность двумерных массивов детекторов к специально внедренным

ошибкам в планы ЛТМИ. Медицинская физика. 2015; (1): 23-31.

Shatenok MP, Korostin IN, Krylova TA, et al. Sensitivity of two-dimensional detector arrays to specially introduced errors in IMRT plans. Medical Physics . 2015; (1): 23-31 (In Russ).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов.

Поступила: 25.03.2025. **Принята к публикации:** 10.06.2025.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors.

Article received: 25.03.2025. **Accepted for publication:** 10.06.2025.