



Характеристика нового
ортогонального двухслойного
многоспекткового коллиматора

VenusX



Характеристика нового ортогонального двухслойного многолепесткового коллиматора VenusX

Краткий обзор

Цель: исследовать и описать эксплуатационные характеристики нового ортогонального двухслойного альфа-многолепесткового коллиматора (α МЛК), установленного на линейном ускорителе VenusX, разработанном медицинской компанией LinaTech.

Методы: точность и воспроизводимость позиционирования лепестков оценивались с помощью устройства электронной портальной визуализации (EPID) в ходе проведения теста «ricket fence» («частокол»). Среднее пропускание, пропускание через лепестки и между ними, пропускание концов лепестков одинарного и двойного слоев коллиматора измерялось с помощью ионизационной камеры. Полутени лепестков α МЛК оценивались с использованием полей квадратной и ромбовидной форм. Чтобы исследовать преимущества ортогонального двухслойного многолепесткового коллиматора (МЛК) в формировании поля, были сформированы круглые поля и треугольные поля с прямым углом как с использованием одного, так и двух слоев α МЛК.

Результаты: средние максимальные отклонения позиционирования верхнего и нижнего слоев α МЛК за 1 год составили $0,76 \pm 0,09$ мм и $0,62 \pm 0,07$ мм соответственно. Средние значения пропускания составили 1,87%, 1,83% и 0,03% для верхнего, нижнего и обоих слоев α МЛК соответственно. Максимальные значения пропускания между лепестками нижнего и двойного слоев составили 2,43% и 0,17% соответственно. Значения пропускания через концы лепестков составили 9,34% и 0,25% соответственно. Значение полутени квадратного поля составило 6,2 мм по оси X и 8,0 мм по оси Y. Средние значения полутени ромбовидных полей с длиной стороны 5 и 10 см составили 3,6 и 4,9 мм соответственно. Круглые поля и треугольные поля с прямым углом, сформированные двухслойным коллиматором, были намного ближе к заданной форме, чем поля, сформированные одним слоем коллиматора. Амплитуда колебаний дозы у 50%-ных изодозных кривых и изменение угла шага лепестков у двухслойного коллиматора были ниже, чем у однослойного.

Выводы: преимущества α МЛК заключаются в его ортогональной двухслойной конструкции. Пропускание лепестков, флуктуация величины дозы на краю поля и зависимость поля от угла шага лепестка в двухслойной α МЛК были значительно снижены, по сравнению с однослойным.

1 | ВВЕДЕНИЕ

Многолепестковый коллиматор (МЛК, англ. MLC) – устройство, наиболее широко используемое для модуляции флюенса пучка с применением методов «Лучевой терапии с модуляцией интенсивности» (ЛТМИ, англ. IMRT) и «Ротационной терапии с модуляцией объёма излучения» (англ. VMAT). МЛК используется в лучевой терапии более 30 лет, и его конструктивные характеристики влияют на расчет терапевтической дозы облучения при планировании лучевой терапии. Однослойный МЛК в основном используется в медицинских линейных ускорителях, таких как ускоритель Varian, оснащённый 120-лепестковым коллиматором Millennium, и ускоритель Elekta, оснащенный МЛК Agility.

К сожалению, применение однослойных МЛК в радиотерапии имеет множество недостатков. Утечка излучения увеличивает дозу внутреннего и внешнего облучения целевого объема, что нежелательно. Кроме того, ширина проекции традиционного однослойного МЛК на плоскость изоцентра обычно составляет от 0,25 до 1,0 см. Следовательно, при «ступенчатой» границе облучаемого поля сглаживание границы ткани-мишени¹ затруднено. Как правило, хороший МЛК должен обладать высокой точностью позиционирования лепестков, низкой пропускаемостью излучения, небольшой по размеру полутенью и способностью точно создавать различные поля сложной формы в зависимости от клинической необходимости.

VenusX – медицинский линейный ускоритель (ЛУ), разработанный медицинской компанией LinaTech (штаб-квартира в г. Саннивейл, США, штат Калифорния). Недавно ЛУ VenusX был одобрен Управлением по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов Китая и уже применяется в клиниках. В настоящее время ЛУ VenusX используется для лучевой терапии различных видов рака, включая злокачественные опухоли головного мозга, рак легких и рак шейки матки. Основным новшеством ЛУ VenusX является его ортогональный двухслойный альфа-многолепестковый коллиматор (α MLC), который состоит из двух взаимно перпендикулярных слоев. Верхний и нижний слой ортогонального МЛК взаимодействуют для формирования поля необходимой формы.

Опубликованные описания нового ортогонального двухслойного α МЛК VenusX отсутствуют. Такие описания позволяют глубже понять его характеристики и одновременно обеспечить гарантию качества при использовании α МЛК в радиотерапии. Таким образом, целью данного исследования было подробное описание эксплуатационных характеристик α МЛК.

2 | МЕТОДЫ

2.1 | Медицинский линейный ускоритель VenusX и α МЛК

ЛУ VenusX включает в себя головку излучателя, кВ/МВ системы визуализации, терапевтический стол и другие вспомогательные системы. ЛУ VenusX обеспечивает режим терапии, включающий конформную лучевую терапию с трёхмерным (объемным) планированием, лучевую терапию с модуляцией интенсивности (IMRT) и ротационную терапию с модуляцией объёма излучения (VMAT). ЛУ VenusX поддерживает компьютерную

¹ Понятие мишень (target) в лучевой терапии обозначает определенный по форме и размерам объем тканей, содержащий патологическое образование (очаг) или орган, подлежащий прицельному облучению

томографию в конусном пучке (kV СВСТ) и другие смешанные режимы под визуальным контролем. Линейный ускоритель VenusX с энергией фотонов 6 МВ работает с использованием режима облучения без выравнивающего фильтра (FFF, Flattening Filter Free), а расстояние источник-ось составляет 90 см. На Рисунке 1 показаны физические характеристики ЛУ VenusX и α МЛК. На Рисунке 2 показана схема узла головки ЛУ VenusX и два ортогональных слоя лепестков МЛК, собранных в блоки. В текущей версии линейного ускорителя VenusX коллиматор не может вращаться. Первичный и вторичный коллиматоры фиксированы.

α МЛК состоит из двух ортогональных слоев, обработанных с использованием вольфрама. Верхний и нижний слои содержат по два блока с 51 лепестком каждый. Расстояние между источником и верхним слоем составляет 24,7 см, расстояние между источником и нижним слоем – 36,4 см. Существует три значения физической толщины лепестков: 1,6, 2,2 и 3,1 мм. Структура верхнего и нижнего слоев МКЛ идентична. Физическая толщина самых удаленных от центра 32 пар лепестков (16 пар с каждой стороны) составляет 3,1 мм. Средние 14 пар лепестков имеют переменную физическую толщину 1,6 и 2,2 мм. Физическая толщина остальных лепестков составляет 2,2 мм. Для нижнего слоя α МЛК ширина проекции при трех значениях физической толщины лепестков в изоцентре составляет 4,0, 5,4 и 7,7 мм соответственно, для верхнего слоя – 5,9, 8,0 и 11,3 мм соответственно. Верхний слой МЛК движется вдоль оси Y (параллельно оси вращения гантри), тогда как нижний слой МЛК движется вдоль оси X (перпендикулярно оси вращения гантри). Физическая высота лепестков α МЛК составляет 7 см, и каждый лепесток способен максимально перемещаться на 40 или 20 см от центральной оси. Кроме того, лепестки имеют закругленные концы и конструкцию боковых сторон в виде паза и выступа (англ. tongue-and-groove), что позволяет осуществлять интердигитацию. Максимальная скорость перемещения лепестков верхнего и нижнего слоев составляет 7 см/с и 6 см/с соответственно.

2.2 | Устройство электронной портальной визуализации

Одним из компонентов ЛУ VenusX является устройство электронной портальной визуализации (EPID). Устройство состоит из блока обнаружения изображения, блока получения изображения, программного обеспечения для анализа изображений и специальной рабочей станции. Блок обнаружения изображений в основном включает детекторы на основе технологии аморфного кремния и соответствующие электронные схемы. Количество эффективных пикселей обнаружения составляет 2816×2816 , фактический размер пикселя – 0,15 мм, что покрывает область эффективного обнаружения 43 см \times 43 см. При проецировании на изоцентр область эффективного обнаружения уменьшается до 26 см \times 26 см. Блок получения изображений включает привод и электронную аппаратуру. Калибровка устройства EPID включает несколько подкалибровок: коррекцию темного поля, коррекцию коэффициента усиления, коррекцию пикселей, коррекцию точности положения устройства EPID во время вращения гентри² и регулировку нормализации дозы. Темное поле служит фоном, вычитаемым после калибровки EPID. Линейность дозы и размер пикселя были проверены после калибровки устройства EPID.

² Гентри – поворотная платформа линейного ускорителя

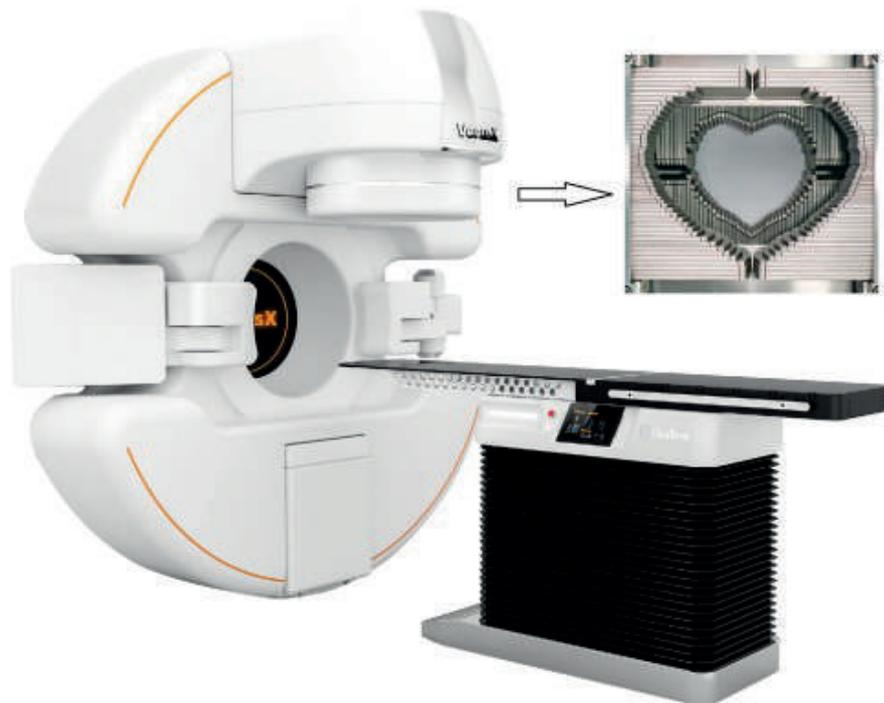


РИСУНОК 1. Иллюстрация медицинского линейного ускорителя VenusX и αМЛК. Физическая схема αМЛК с угла зрения пациента. αМЛК, альфа-многолепестковый коллиматор.

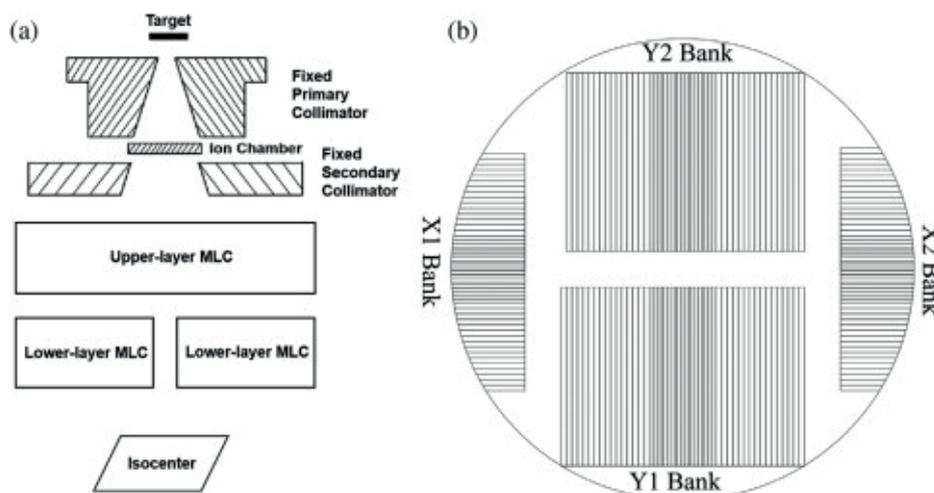


РИСУНОК 2. Схема (а) сборки головки ЛУ VenusX и (б) двух ортогональных слоев блоков лепестков МЛК. МЛК, многолепестковый коллиматор.

2.3 | Точность и воспроизводимость позиционирования лепестков

Мы измерили точность и воспроизводимость позиционирования верхнего и нижнего слоев αМЛК соответственно. Для оценки точности и воспроизводимости позиционирования лепестков использовалось автоматизированное программное обеспечение контроля качества (MLC QA). Данное программное обеспечение было предоставлено компанией LinaTech и интегрировано в ЛУ VenusX для ежедневных процедур контроля МЛК. Для проведения теста «picket fence» («частокол») использовалось программное обеспечение QA, для получения изображений – устройство EPID. Тест «picket fence» включал семь полей облучения с шириной зазора 2 см между противоположащими лепестками в различных положениях. Один слой αМЛК был открыт до максимального положения, а другой слой

перемещался в различные позиции в соответствии с заданным положением. Устройство EPID использовалось для получения изображений каждого поля. Точность позиционирования лепестков рассчитывалась путем определения отклонения между фактическим положением и номинальным установленным положением. В течение рабочего дня в рамках ежедневного контроля качества были получены три независимых повторных изображения, также были проанализированы данные измерений, записанные с июня 2020 года по июнь 2021 года. Краткосрочная воспроизводимость рассчитывалась по трем независимым повторным изображениям в течение рабочего дня, тогда как долгосрочная воспроизводимость определялась как среднее значение краткосрочных значений воспроизводимости. Для оценки влияния силы тяжести на точность позиционирования лепестков тесты «ricket fence» также проводились при углах гантри 90°, 180° и 270° с углом коллиматора 0°.

2.4 | Пропускание лепестков

2.4.1 | Среднее пропускание лепестков

Измерение средней дозы пропускания лепестков проводилось с помощью ионизационной камеры типа Фармер (англ. Farmer) (IBA, FC65-G) в водном фантоме, расстояние источник–поверхность (SSD) составило 90 см. Ионизационная камера была расположена вдоль центральной оси пучка. Глубина максимальной дозы (d_{max}) и глубина 10 см были установлены в качестве глубины замера, а установленная мощность дозы – 1600 мониторных единиц. Глубина 10 см была выбрана для обеспечения стабильности измерений. Мы оценивали среднее пропускание лепестков отдельно для каждого блока лепестков одного и двух слоев α МЛК.

Чтобы оценить среднее пропускание лепестков нижнего слоя МЛК, мы сначала измерили дозу, когда лепестки блока X1 нижнего слоя МЛК были полностью закрыты. Затем мы измерили дозу, когда лепестки X2 нижнего слоя МЛК были полностью закрыты. Среднее значение всех доз было рассчитано и нормализовано относительно дозы, измеренной на центральной оси открытого поля размером 10 см × 10 см на той же глубине. Аналогичный процесс был использован для измерения среднего пропускания лепестков верхнего слоя МЛК.

Для измерения среднего пропускания лепестков обоих слоев α МЛК дозы были измерены в полях, которые были полностью закрыты с помощью лепестков X1 нижнего слоя и лепестков Y1 верхнего слоя, а также лепестков X2 нижнего слоя и лепестков Y2 верхнего слоя. Был использован тот же метод расчета и стандартизации, что и для каждого отдельного слоя.

2.4.2 | Пропускание между лепестками, через сами лепестки, пропускания концов лепестков

Пропускание лепестков состоит из пропускания через зазоры между лепестками (межлепестковое пропускание) и пропускания через сами лепестки. Мы оценивали пропускание лепестков нижнего и обоих слоев с помощью водного фантома Blue Phantom (IBA Dosimetry GmbH, Германия) с камерой CC13 (IBA Dosimetry GmbH, Германия). Измерения проводились на расстоянии источник–камера 90 см на глубине максимальной дозы (d_{max}) в воде. Для оценки пропускания лепестков нижнего слоя α МЛК лепестки

нижнего слоя были закрыты в положении X, равном -150 мм, тогда как лепестки верхнего слоя были открыты. Для оценки пропускания лепестков обоих слоев α МЛК лепестки нижнего слоя были закрыты в положении X -150 мм, тогда как лепестки верхнего слоя были закрыты в положении Y $+150$ мм. Профиль пропускания измерялся поперек направления движения лепестков нижнего слоя в точках X, равных 0, $+50$ и $+100$ мм с разрешением 1 мм. Все измерения были нормализованы относительно дозы, измеренной на центральной оси открытого поля размером $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$ на глубине максимальной дозы.

Для измерения пропускания концов лепестков нижнего слоя α МЛК лепестки нижнего слоя были закрыты в положении X, равном -100 мм, тогда как лепестки верхнего слоя были открыты. Для измерения пропускания концов лепестков обоих слоев α МЛК лепестки нижнего слоя были закрыты в положении X -100 мм, тогда как лепестки верхнего слоя были закрыты в положении Y $+100$ мм. Профили пропускания были получены в положениях Y 0 мм.

2.5 | Полутень лепестков

Мы использовали пленку Gafchromic EBT-XD (Ashland Inc., г. Бриджуотер, штат Нью-Джерси, США) и водный фантом для измерения полутеней квадратных и ромбовидных полей, сформированных α МЛК. Размер квадратного поля составил $10 \text{ см} \times 10 \text{ см}$. Длина стороны двух ромбовидных полей – 5 и 10 см соответственно. Пленки были помещены на глубину 10 сантиметров под слоем водного фантома с обратно-рассеянным излучением 5 см и расстоянием от источника до оси 90 см. Из-за того, что ЛУ VenusX использует облучение без выравнивающего фильтра, мы рассчитали полутень по методу, предложенному Понишем и соавторами, и Лимом и соавторами. Пониш и соавторы ввели понятие точки перегиба для анализа полутени, создаваемой лепестками при облучении без выравнивающего фильтра. Максимум первой производной рассчитывался как точка перегиба в профиле пучка. Затем профили были нормализованы относительно точки перегиба, которая соответствовала точке 50%-й дозы. Мы рассчитали ширину полутени МЛК, определив расстояние от положения 80% значения и 20% значения дозы относительно дозы на центральной оси пучка.

2.6 | Дозиметрический зазор между лепестками

Измерение дозиметрического зазора между лепестками (DLG) проводилось для учета эффекта лепестков с закругленными концами. Ионизационная камера типа Фармер (Farmer) использовалась для измерений DLG нижнего и верхнего слоев α МЛК, выполненных при расстоянии источник–поверхность (SSD) 90 см в водном фантоме на глубине 10 см. Метод соответствовал рекомендациям, предоставленным поставщиками ускорителя Varian. Для определения значений DLG использовался метод широких зазоров между лепестками МЛК (2, 4, 6, 10, 14, 16 и 20 мм), перемещающихся от -60 мм до 60 мм с постоянной скоростью. После расчета среднего пропускания лепестков МЛК был построен график зависимости скорректированного показания зазора от размера зазора. Было применено линейное приближение, а пересечение по оси Y обеспечило эффект лепестков с закругленными концами. Абсолютное значение пересечения по оси Y определяет значение DLG.

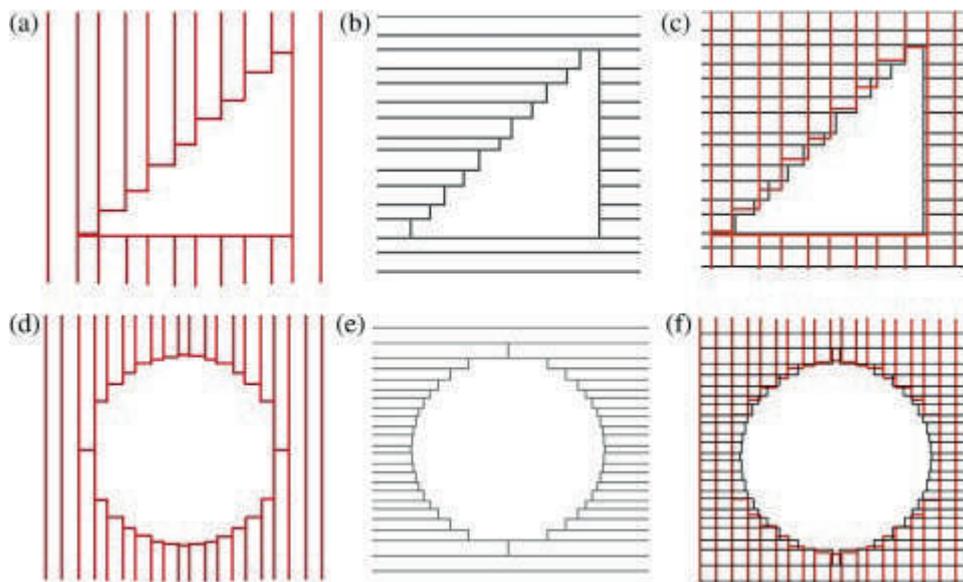


РИСУНОК 3. Схема формирования круглых поля и треугольных полей с прямым углом α МЛК. (а) Вид треугольного поля с прямым углом, сформированного лепестками верхнего слоя α МЛК. (б) Вид треугольного поля с прямым углом, сформированного лепестками нижнего слоя α МЛК. (с) Вид треугольного поля с прямым углом, сформированного лепестками обоих слоев α МЛК. (d) Вид круглого поля, сформированного лепестками верхнего слоя α МЛК. (е) Вид круглого поля, сформированного лепестками нижнего слоя α МЛК. (f) Вид круглого поля, сформированного лепестками обоих слоев α МЛК.

2.7 | Эффективности формирования поля с помощью МЛК

Для демонстрации эффективности формирования поля с помощью α МЛК использовались круглые и треугольные поля с прямым углом, как описано Лю и соавторами. Мы использовали треугольное поле с прямым углом для исследования флуктуация величины дозы на краю поля, создаваемого α МЛК, как показано на рисунке 3а–с. Мы использовали круглое поле диаметром 10 см для исследования зависимости α МЛК от угла шага лепестка, как показано на рисунке 3d–f. Для однослойного МЛК угол шага определялся как угол между направлением движения лепестков и касательной к кривой края поля. Для двухслойного МЛК угол шага определялся как больший из двух углов шага верхнего и нижнего слоев. Мы сравнили поля, сформированные с использованием двух слоев

αМЛК, с соответствующими полями, сформированными с использованием только одного слоя αМЛК. Для получения изображений использовалось устройство EPID.

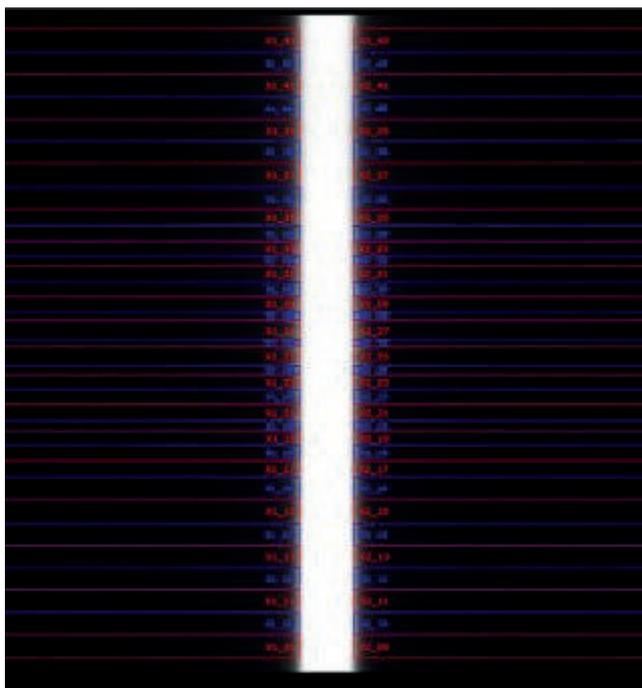


РИСУНОК 4. Одно из полей, полученных устройством электронной портальной визуализации (EPID) в ходе проведения теста «picket fence» («частокол»).

3 | РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1 | Точность и воспроизводимость позиционирования лепестков

Точность и воспроизводимость позиционирования были проанализированы путем выставления лепестков в соответствующих слоях. На Рисунке 4 изображено одно из полей, полученных устройством EPID при проведении теста «picket fence». Среднее максимальное отклонение между фактическим и целевым положением лепестков было проанализировано в период с июня 2020 по июнь 2021 года. Это значение составило $0,76 \pm 0,09$ мм для лепестков верхнего слоя и $0,62 \pm 0,07$ мм для лепестков нижнего слоя. Кратковременная воспроизводимость каждого слоя находилась в пределах 0,3 мм. Долговременная воспроизводимость лепестков верхнего слоя составила $0,29 \pm 0,03$ мм, нижнего слоя – $0,26 \pm 0,08$ мм.

В Таблице 1 показано измерение отклонения положения лепестков αМЛК для верхнего и нижнего слоев при разных углах поворота гантри. Отклонение положения лепестков при углах гантри 90° и 270° составило менее 1 мм, но больше, чем при 0° и 180° . Максимальное отклонение положения лепестков составило 0,90 мм для верхнего слоя αМЛК при угле гантри 90° .

ТАБЛИЦА 1. Измерение отклонения положения лепестков для верхнего и нижнего слоя αМЛК при различных углах гантри.

	Верхний слой				Нижний слой			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
Минимальное отклонение (мм)	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2
Максимальное отклонение (мм)	0,7	0,9	0,7	0,8	0,6	0,8	0,7	0,8
Среднее отклонение (мм)	0,5	0,7	0,5	0,6	0,4	0,6	0,5	0,6

ТАБЛИЦА 2. Средняя пропускание лепестков для каждого слоя αМЛК и обоих слоев αМЛК

	Глубина максимальной дозы (d _{max})	Глубина (d = 10 см)
Блок лепестков верхнего слоя Y1	1,85%	1,86%
Блок лепестков верхнего слоя Y2	1,87%	1,87%
Среднее значение для лепестков верхнего слоя	1,86%	1,87%
Блок лепестков нижнего слоя X1	1,81%	1,82%
Блок лепестков нижнего слоя X2	1,82%	1,84%
Среднее значение для лепестков нижнего слоя	1,82%	1,83%
Два слоя: блок лепестков нижнего слоя X1 и блок лепестков верхнего слоя Y1	0,03%	0,03%
Два слоя: блок лепестков нижнего слоя X2 и блок лепестков верхнего слоя Y2	0,03%	0,03%
Среднее значение для лепестков обоих слоев	0,03%	0,03%

3.2 | Пропускание лепестков

3.2.1 | Среднее пропускание лепестков

В Таблице 2 приведены средние значения пропускания лепестков для верхнего, нижнего и двойного слоев αМЛК на глубине максимальной дозы (d_{max}) и глубине 10 см. Значения на обеих глубинах были схожими для верхнего, нижнего и двойного слоя αМЛК.

3.2.2 | Пропускание между лепестками, через сами лепестки, пропускания концов лепестков

На Рисунке 5 показаны профили пропускания лепестков через зазоры между лепестками (межлепестковое пропускание) и через сами лепестки для нижнего и двойного слоев αМЛК. На графиках показаны профили, полученные при пропускании непосредственно через лепестки и через зазоры между лепестками. Максимальное пропускание между лепестками составило 2,43% для лепестков нижнего слоя и 0,17% для лепестков обоих слоев. На Рисунке 6 показаны профили пропускания концов лепестков для лепестков нижнего слоя и

для лепестков обоих слоев. Пропускание концов лепестков составило 9,34% для лепестков нижнего слоя и 0,25% для лепестков обоих слоев.

3.3 | Полутень лепестков

Рисунок 7 иллюстрирует изодозные кривые квадратных и ромбовидных полей, сформированных двумя слоями лепестков α МЛК. В Таблице 3 представлены значения полутени лепестков различных полей, измеренные на глубине 10 см ЛУ VenusX. Полутень лепестков была измерена в направлениях X и Y. Средняя полутень лепестков квадратного поля размером 10 см \times 10 см составила 6,2 мм в направлении X и 8,0 мм в направлении Y. Полутень лепестков ромбовидного поля была меньше, чем квадратного поля: средняя полутень ромбовидного поля с длиной стороны 5 см \times 5 см и 10 см \times 10 см составляла 3,6 и 4,9 мм соответственно.

3.4 | Измерение дозиметрического зазора (DLG) между лепестками

На Рисунке 8 представлены показания ионизационной камеры с поправкой на пропускание для различных значений ширины зазора и графики линейного приближения для лепестков нижнего и верхнего слоев. Измеренные значения DLG для нижнего и верхнего слоев лепестков составили 1,58 и 2,15 мм соответственно.

3.5 | Эффективности формирования поля с помощью МЛК

На Рисунке 9 изображены треугольные поля с прямым углом, сформированные отдельно лепестками верхнего, нижнего и обоих слоев α МЛК, полученные устройством EPID и представленные соответствующими изодозными кривыми. Как хорошо видно на Рисунке 9, треугольное поле с прямым углом, сформированное двойным слоем лепестков, более точно соответствует заданному полю, чем поле, сформированное лепестками одного слоя. Амплитуды колебания дозы для 50%-ных изодозных кривых составили 2,4, 2,2 и 0,6 мм для верхнего, нижнего и обоих слоев соответственно. Амплитуды колебания дозы для 50%-ных изодозных кривых для двух слоев лепестков была меньше, чем для одного слоя лепестков. На Рисунке 10 показаны результаты вычитания поверхностной дозы для верхнего и нижнего слоя в сравнении с обоим слоям α МЛК. Процент нормализованного результата вычитания обозначен масштабной полоской на Рисунке 10. Разница в поверхностных дозах в основном наблюдалась на краю поля.

На Рисунке 11 представлены изображения поля круглой формы, полученные с помощью устройства EPID, а также соответствующие 50%-ные изодозные кривые. Круглое поле, сформированное обоими слоями α МЛК, более точно соответствовало заданному полю, чем поле, сформированное одним слоем α МЛК. Угол шага лепестка круглого поля, сформированного верхним слоем МЛК, составил 80,7° в верхней и нижней частях круга и 18,3° на левой и правой сторонах. Угол шага лепестка круглого поля, сформированного нижним слоем α МЛК, составил 24° в верхней и нижней частях круга и 82,9° на левой и правой сторонах. Угол шага лепестка круглого поля, сформированного обоими слоями α МЛК, составил 80,8° в верхней и нижней частях круга и 82,9° на левой и правой сторонах. Изменение угла шага для двухслойного α МЛК с каждой стороны было меньше, чем для одного слоя α МЛК. На Рисунке 11 показано преимущество двухслойного α МЛК по сравнению с однослойным в отношении снижения зависимости от угла шага лепестка.

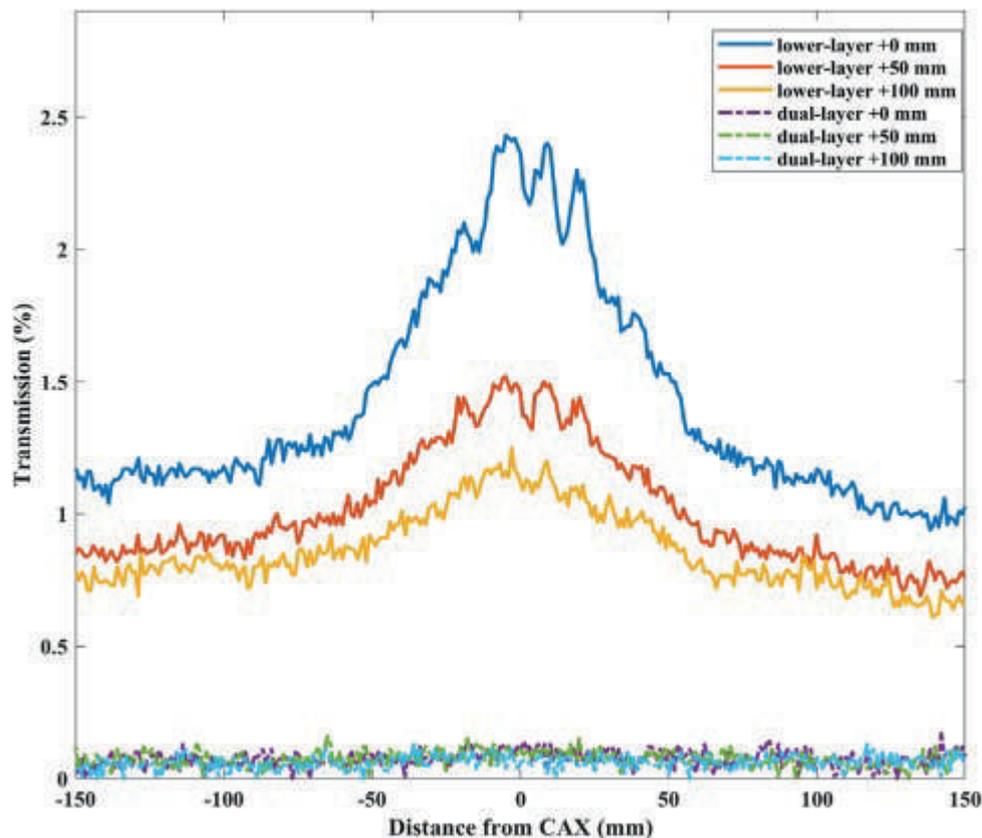


РИСУНОК 5. Профили пропускания между лепестками нижнего слоя и обоих слоев α МЛК, полученные при перпендикулярном направлении движения лепестков нижнего слоя в положениях X +0, +50 и +100 мм. α МЛК, альфа-многолепестковый коллиматор.

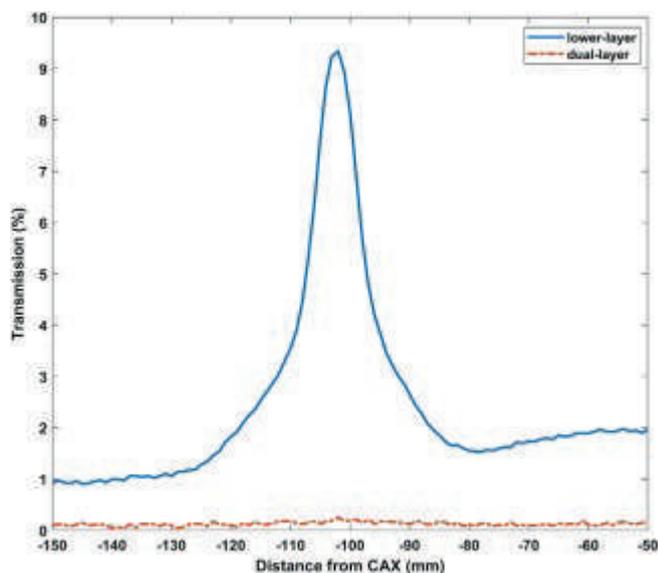


РИСУНОК 6. Профили пропускания концов лепестков нижнего слоя и обоих слоев α МЛК, полученные параллельно направлению движения лепестков нижнего слоя в положении Y 0 мм. α МЛК, альфа-многолепестковый коллиматор.

4 | ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Современные МЛК, как правило, имеют один слой; однако, многослойные МЛК постепенно внедряются в клиническую практику. Многослойные МЛК обладают рядом важных

преимуществ, таких как снижение дозы облучения здорового органа за пределами целевого объема, а также снижением затрачиваемого времени и количества контрольных блоков. Хотя двухслойный микро-МЛК (DmMLC) состоит из двух ортогональных слоев, между микро-МЛК (DmMLC) и α МЛК есть два основных различия. Во-первых, DmMLC является дополнительным устройством, расширяющим функциональные возможности ЛУ. Во-вторых, DmMLC является микро-МЛК с максимально возможным размером поля всего 9,7 см \times 10,8 см. Хотя ЛУ Halcyon имеет двухслойную систему МЛК, его МЛК имеет многоуровневую и ступенчатую конструкцию. Насколько нам известно, α МЛК является первым ортогональным двухслойным МЛК, интегрированным в головку (гентри). В данном исследовании впервые рассмотрены конструкция МЛК и характеристики α МЛК.

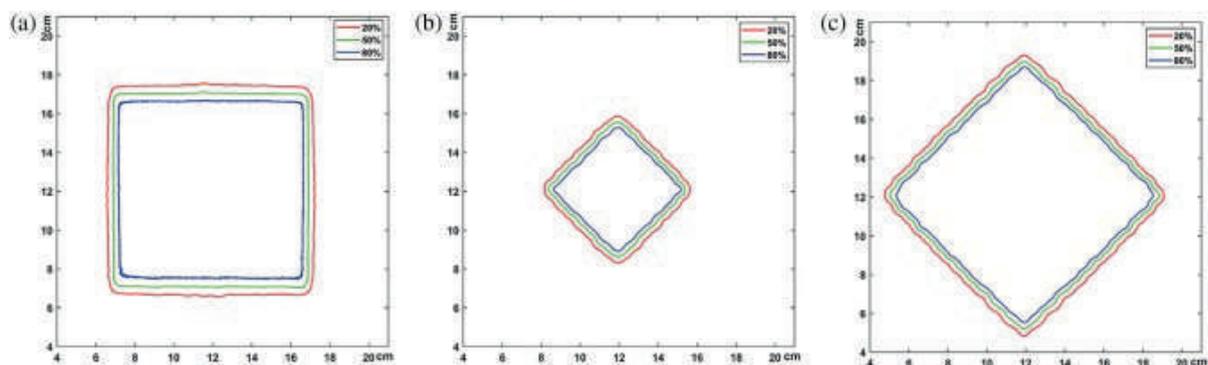


РИСУНОК 7. Изодозные кривые квадратных и ромбовидных полей, сформированных лепестками двухслойного α МЛК. Для получения изображений использовалась пленка, которая была помещена на глубину 10 см под слоем водного фантома при расстоянии источник–поверхность (SSD) 80 см. (а) квадратное поле 10 см \times 10 см; (б) квадратное поле 5 см \times 5 см; (с) квадратное поле 10 см \times 10 см. SSD, расстоянию источник–поверхность; α MLC, альфа-многолепестковый коллиматор.

ТАБЛИЦА 3. Значения полутени лепестков различных полей α МЛК, измеренных на глубине 10 см в водном фантоме.

	X1	X2	Y1	Y2
Квадратное поле (10 см \times 10 см)	6,2	6,1	8,2	7,8
Ромбовидное поле (5 см \times 5 см)	3,3	3,4	4,1	3,6
Ромбовидное поле (10 см \times 10 см)	5,3	5	4,8	4,3

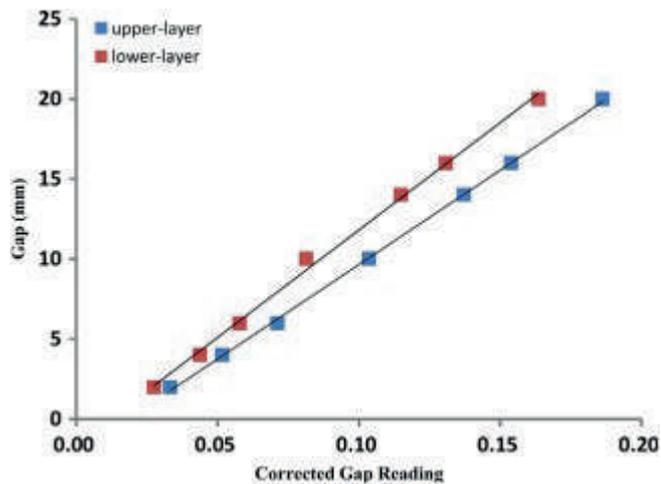


РИСУНОК 8. График зависимости скорректированного показания зазора в зависимости от размера зазора нижнего и верхнего слоя α МЛК. Для измерения дозиметрического зазора между лепестками (DLG) применялось линейное приближение. DLG, дозиметрический зазор между лепестками; α МЛК, альфа-многолепестковый коллиматор.

Точность позиционирования лепестков влияет на выполнение плана лечения, так как неточное позиционирование лепестков приводит к значительным отклонениям дозы. Мы обнаружили, что точность и воспроизводимость позиционирования лепестков α МЛК составили <1 мм, что соответствует требованиям, изложенным в отчетах рабочей группы 142 и рабочей группы 198 Американской ассоциации физиков в медицине (AAPM), что указывает на надлежащую стабильность α МЛК.

Пропускание лепестков является важным систематическим параметром для планирования лечения, особенно при более сложных перемещениях лепестков МЛК. Низкая утечка дозы минимизирует риск неблагоприятных эффектов, избегая воздействия на органы, подверженные риску. Многослойные МЛК характеризуются более низкой утечкой дозы, чем однослойные МЛК. Перпендикулярное размещение верхнего и нижнего слоев МЛК снижает межлепестковое пропускание и пропускание через сами лепестки. Согласно данным рабочей группы 50 Ассоциации AAPM, среднее пропускание лепестков должно быть $<2\%$, и среднее пропускание лепестков одного слоя α МЛК, определенное в настоящем исследовании, соответствует этому требованию. Также было выявлено, что пропускание лепестков двухслойного α МЛК значительно снижено по сравнению с однослойным МЛК. Для МЛК Agility компании Elekta, 120-лепесткового коллиматора Millennium компании Varian, системы MRIdian компании ViewRay, использовавшей кобальт-60 в качестве источника излучения, и МЛК компании Euromechanics измеренные средние значения пропускание лепестков составили 0,35%, 1,36%, 0,153% и 1,79% соответственно. Максимальные значения пропускание лепестков этих МЛК составляют 0,44%, 1,8%, 0,35% и 4,1% соответственно. Таким образом, двухслойный α МЛК демонстрирует более низкое пропускание лепестков, чем вышеупомянутые коммерческие системы МЛК.

Мы провели отдельные измерения дозиметрического зазора между лепестками (DLG) для нижнего и верхнего слоев α МЛК. Определение DLG для ортогонального двухслойного МЛК было сложным из-за отсутствия эталонного метода. Поскольку верхний и нижний слои α МЛК могут быть использованы вместе для определения границ поля, DLG

двухслойного МЛК минимален. Мы намерены рассмотреть этот вопрос в будущих исследованиях.

Двухслойный α МЛК более точно соответствовал формам круглых полей и треугольных полей с прямым углом по сравнению с однослойным МЛК. Взаимодействие верхнего и нижнего слоев α МЛК обеспечивает точное формирование границ поля. Использование двухслойного α МЛК может уменьшить флуктуацию величины дозы на краю поля и уменьшить зависимость формы поля МЛК от угла шага лепестка. Таким образом эксплуатационные характеристики для сглаживания границ поля улучшаются. В целом, α МЛК обеспечивает более точное формирование границы поля, чем однослойный МЛК.

Конструкция α МЛК дает преимущества при конформной лучевой терапии, особенно в таких случаях, как лечение пациентов с лимфомы Ходжкина, получающих облучение мантийного поля. Поскольку в настоящее время значительная часть лучевой терапии проводится с применением методов «Лучевой терапии с модуляцией интенсивности» (ЛТМИ, англ. IMRT) и «Ротационной терапии с модуляцией объема излучения» (англ. VMAT), клиническое применение α МЛК все еще находится на ранней стадии. Необходимы дальнейшие исследования, чтобы определить, дает ли ортогональная двухслойная конструкция α МЛК значительные клинические преимущества, особенно в плане защиты нормальных тканей или органов. Кроме того, помимо характеристик МЛК, такие факторы, как алгоритм обратной оптимизации дозы МЛК, механизм расчета дозы и метод доставки излучения, тесно связаны с качеством планов лечения при реализации технологий IMRT или VMAT. В данном исследовании мы сосредоточились исключительно на описании α МЛК, не обращая внимания на другие технические параметры, связанные с этим новым ортогональным двухслойным коллиматором. Будущие исследования будут направлены на оценку нового алгоритма оптимизации и метода доставки излучения на основе ортогонального двухслойного МЛК, чтобы полностью изучить его преимущества.

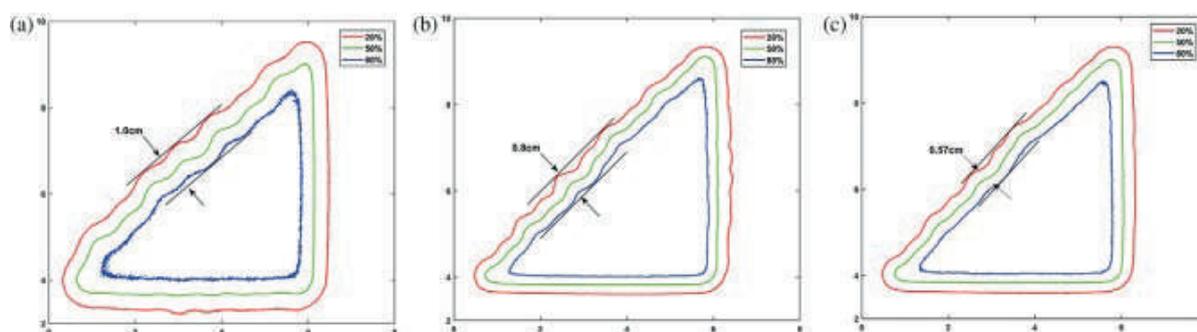


РИСУНОК 9. Изодозные кривые треугольных полей с прямым углом, отдельно сформированных верхним, нижним и обоими слоями α МЛК. (а) Верхний слой α МЛК; (б) нижний слой α МЛК; (с) оба слоя α МЛК. α МЛК, альфа-многолепестковый коллиматор.

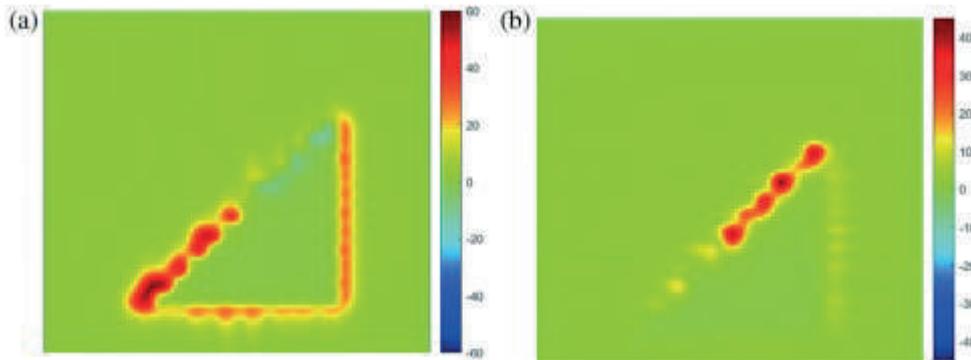


РИСУНОК 10. Сравнение поверхностных доз в парах изображений α МЛК, полученное посредством вычитания доз. (а) Верхний слой α МЛК в сравнении с обоими слоями α МЛК. (б) Нижний слой α МЛК в сравнении с обоими слоями α МЛК. α МЛК, альфа-многолепестковый коллиматор

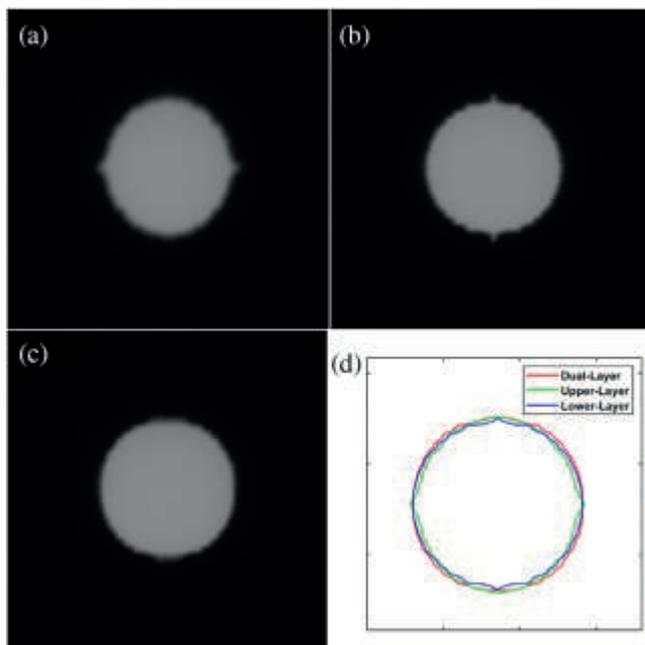


РИСУНОК 11. Изображение поля круглой формы, полученные с помощью устройства EPID, сформированные однослойным и двухслойным α МЛК, а также соответствующие 50%-ные изодозные кривые. (а) Изображение поля EPID, полученное с помощью устройства EPID, сформированное верхним слоем α МЛК; (б) поле, образованное нижним слоем α МЛК; (с) поле, образованное обоими слоями α МЛК; (d) 50%-ные изодозные кривые, соответствующая трем изображениям. EPID, устройства электронной портальной визуализации α МЛК, альфа-многолепестковый коллиматор.

5 | ВЫВОДЫ

Мы провели систематическую оценку эксплуатационных характеристик ортогонального двухслойного α МЛК компании LinaTech. Точность и воспроизводимость позиционирования α МЛК были стабильными и отвечали соответствующим стандартам. Благодаря двухслойной конструкции коллиматора пропускание между лепестками и через них было значительно снижено. Поскольку верхний и нижний слои α МЛК взаимодействуют для определения границ поля, α МЛК эффективно их сглаживает. Уменьшение флуктуации величины дозы на краю поля и уменьшение зависимости формы поля MLC от угла шага лепестка демонстрируют преимущества двухслойного α МЛК.