

Анализ конструктивных особенностей радиологических фантомов молочной железы для верификации систем стабилизации положения болюса

И. Н. Чиркова

РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова, (агр. Лесной, Республика Беларусь)

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь)

Email: irinagutkovskaya@gmail.com

1 Введение. Органосохраняющее лечение рака молочной железы включает секторальную резекцию и последующую лучевую терапию с подведением повышенной дозы к ложе опухоли. Качество формирования поверхностной дозы в зоне послеоперационного рубца имеет принципиальное значение для локального контроля. Для смещения максимума ионизации к поверхности и выравнивания дозы применяются тканеэквивалентные болюсные накладки, эффективность которых определяется стабильностью и плотностью прилегания к коже.

Экспериментально показано, что геометрия контакта «болюс–поверхность» существенно влияет на распределение дозы. Воздушные зазоры 0.5–1.0 см приводят к снижению дозы в контрольной точке на поверхности на 23% и отклонению распределения дозы по объёму мишени до 16%. При плотной фиксации обеспечивается получение 75–80% запланированной дозы на поверхности и охват мишени на уровне 95% предписанной дозы. Эти данные подчёркивают критическую чувствительность поверхностной дозы к наличию и величине воздушных зазоров [1].

Молочная железа после органосохраняющей операции является мягкотканной структурой, подверженной деформации под действием систем иммобилизации и повторных укладок, что затрудняет воспроизведение стабильного контакта болюса с кожей. Для анализа влияния положения болюса и верификации методик облучения применяются радиологические фантомы, которые должны быть тканеэквивалентными по радиационным свойствам и одновременно по возможности имитировать механическое поведение молочной железы.

Целью работы является анализ конструктивных особенностей современных радиологических фантомов молочной железы с точки зрения их пригодности для оценки качества фиксации болюсных накладок и влияния воздушных зазоров на поверхностную дозу.

2 Обзор существующих фантомов молочной железы.

2.1 Антропоморфные торсовые фантомы. Антропоморфные торсовые фантомы (CIRS, RANDO) применяются для верификации дозиметрических планов облучения грудной клетки и молочной железы при высокотехнологичных методах лучевой терапии. Они обеспечивают реалистичную геометрию грудной клетки и распределение плотностей, близкое к реальным тканям, что позволяет сравнивать расчётные дозовые распределения с экспериментальными измерениями и выполнять испытания полного технологического цикла (end-to-end тесты). Основное ограничение этого класса фантомов – жёсткость тканеэквивалентных материалов. Область, имитирующая грудную клетку и молочную железу, практически не деформируется под действием систем иммобилизации и собственного веса моделируемых тканей. При моделировании болюса на такой поверхности можно оценить дозу и изодозное распределение, но невозможно воспроизвести типичные для реального пациента деформации мягких тканей и формирование воздушных зазоров под болюсом. Таким образом, эти фантомы ориентированы прежде всего на дозиметрическую, а не механическую валидацию [2].

2.2 Специализированные диагностические фантомы молочной железы. Специализированные фантомы для визуализации (PhantomX Breast, маммографические и

томосинтетические фантомы) разрабатываются для контроля качества маммографии, томосинтеза и КТ-симуляции. Они обеспечивают стандартизированную модель молочной железы для калибровки протоколов визуализации, оценки контрастно-разрешающей способности и контроля стабильности качества изображения. С точки зрения лучевой терапии их возможности ограничены. Глубина моделируемого объёма зачастую недостаточна для корректной оценки распределения дозы в терапевтических мегавольтных пучках, конструкцией, как правило, не предусмотрены полости для установки дозиметрических детекторов в объёме. Отсутствует совместимость с укладочными и иммобилизационными средствами, применяемыми при облучении (вакуумные матрасы, фиксирующие системы для груди, специальные подставки и опоры для молочной железы). Жёсткая оболочка, ориентированная на стабильность формы, не воспроизводит механическую податливость мягких тканей, поэтому такие фантомы фактически не пригодны для исследования деформации молочной железы под действием болюса и оценки плотности его прилегания [3].

2.3 3D-печатные фантомы молочной железы. 3D-печатные фантомы представляют собой индивидуализированные или типовые модели, изготовленные по данным медицинской визуализации с использованием аддитивных технологий для испытаний полного технологического цикла (end-to-end тестирования) методик облучения. Использование 3D-печати позволяет воспроизводить сложную геометрию поверхности и внутреннюю структуру молочной железы, включая форму после операции и расположение ложа опухоли, а также подбирать материалы с радиационно-физическими свойствами, близкими к водозквивалентным. Возможность интеграции с антропоморфным торсом и размещения дозиметрических детекторов в заданных объёмах делает такие фантомы удобным инструментом для комплексного тестирования КТ-симуляции, планирования и доставки дозы. Однако большинство 3D-печатных фантомов изготавливается из жёстких фотополимеров или пластиков, которые не воспроизводят механические свойства мягких тканей. Деформация молочной железы под действием систем иммобилизации и болюса практически не моделируется. Это ограничивает возможности таких фантомов для исследования формирования воздушных зазоров под болюсом, смещения мягких тканей и реального качества контакта «болюс–кожа», несмотря на их высокую ценность для геометрической и дозиметрической валидации планов облучения [4].

3 Обсуждение и перспективы разработки специализированного фантома. Обзор существующих решений показывает, что доступные фантомы хорошо закрывают либо дозиметрические, либо визуализационные задачи, но практически не затрагивают ключевой для болюсных накладок аспект – реалистичную механику мягких тканей молочной железы. Жёсткие композитные и 3D-печатные материалы обеспечивают стабильную геометрию и водозквивалентные радиационные свойства, однако не деформируются под действием систем иммобилизации и болюса так, как это происходит у реального пациента. В результате невозможно корректно смоделировать образование воздушных зазоров, изменение плотности контакта «болюс–кожа» при повторных укладках и количественно связать эти эффекты с недобором или избыточностью дозы в поверхностных слоях.

Учитывая клиническую значимость адекватной поверхностной дозы у пациенток после органосохраняющих операций, возникает необходимость в разработке специализированного фантома молочной железы из тканезквивалентного материала, который по своим механическим свойствам (модулю упругости, степени деформации под нагрузкой) соответствовал бы мягким тканям груди по всему объёму модели. Такой подход открывает возможность подбора композиционных материалов с заданными радиационными и упругими характеристиками, а также исследования конструктивных решений, обеспечивающих воспроизведение типичных деформаций молочной железы под действием систем иммобилизации и болюсных накладок.

3 Заключение. Проведённый анализ показал, что существующие классы фантомов решают преимущественно частные подзадачи и не удовлетворяют одновременно дозиметрическим и механическим требованиям, предъявляемым к верификации систем

фиксации болюсных накладок. Антропоморфные торсовые фантомы пригодны для трёхмерной дозиметрической верификации планов облучения, однако не воспроизводят деформацию мягких тканей и не позволяют корректно моделировать формирование воздушных зазоров под болюсом. Специализированные диагностические фантомы эффективны для контроля качества визуализации, но их применимость в задачах лучевой терапии ограничена. Развиваемое направление 3D-печатных фантомов молочной железы расширяет возможности испытаний полного технологического цикла (end-to-end тестирования) методик облучения, однако использование жёстких полимерных материалов вновь ограничивает возможность достоверной имитации механического поведения мягких тканей. Отсутствие фантомов, сочетающих тканезквивалентные радиационные свойства и упругие характеристики мягких тканей по всему объёму, указывает на ограниченность существующей экспериментальной базы для комплексной оценки систем фиксации болюса. Разработка специализированного фантома молочной железы с заданными механическими и дозиметрическими свойствами представляется перспективным направлением, способным повысить достоверность предклинической валидации систем фиксации болюса и улучшить качество реализации предписанной дозы у пациенток после органосохраняющего лечения.

Литература.

1. Чиркова, И.Н. Анализ дозиметрических параметров модели распределения дозы ионизирующего излучения при моделировании облучения поверхности грудной клетки / И.Н. Чиркова, М.Н. Петкевич, М.В. Тумилович // Медэлектроника-2024: сборник научных статей XVI Международной научно-технической конференции, Минск, 5-6 декабря 2024 г.: БГУИР/ М.В. Давыдов, И.И. Ревинская, В.В. Гоман. – Минск, 2024. – С. 260 – 265.
2. Schenkel K., Müller J., Braun M. Evaluation of tube current modulation techniques in thoracic CT using CIRS ATOM anthropomorphic phantoms // European Congress of Radiology (ECR-2014): Abstracts. Vienna, 2014. Sugimura A. Auger recombination effect on threshold current of InGaAsP quantum well lasers // IEEE J. Quantum Electron. – 1983. – Vol. QE-19, № 6. – P. 932–941.
3. Vasilev Ya.A., Omelyanskaya O.V., Nasibullina A.A., Leonov D.V., Bulgakova J.V., Akhmedzyanova D.A., Akhmedzyanova D.A., Shumskaya Y.F., Reshetnikov R.V. Anthropomorphic breast phantoms for radiology imaging: a review // Digital Diagnostics. 2023. Т. 4, № 4. С. 569–592. doi:10.17816/DD623341.
4. Borren A., Zbiri S., Van den Heuvel F., Verhaegen F. Development of 3D-printed breast phantoms for end-to-end testing of VMAT breast treatments // Medical Physics. 2020. Т. 47, № 8. С. 3270–3278. doi:10.1002/mp.14227.